

**Evaluierung mobiler und stationärer Messmethoden
zur Bestimmung toxikologisch relevanter Staubpartikel in
der Umwelt**

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
des Fachbereichs Medizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Albeser, Simon
aus Bad Nauheim

Gießen 2018

Aus dem Institut für Arbeits- und Sozialmedizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Leiter: Prof. Dr. med. Joachim Schneider

Gutachter: Professor Dr. med. Joachim Schneider

Gutachter: Professor Dr. med. Dr. jur. Reinhard B. Dettmeyer

Tag der Disputation: 13.08.2018

1. EINLEITUNG.....	1
2. ALLGEMEINE GRUNDLAGEN	4
2.1. Staub – Definition	4
2.2. Dieselrußpartikel	13
2.3. Entstehung von Stäuben	14
2.4. Überwachung der Staubbelastung in Hessen.....	15
2.5. Feinstaub im Umweltschutz	16
2.6. Ziel der Arbeit	18
3. MATERIAL UND METHODE	20
3.1. Material.....	20
3.1.1. Der Kondensationskernzähler CPI 3007	20
3.1.2. Die Staubmesseinrichtung Respicon TM	20
3.2. Umweltmessungen	22
3.2.1. Geräteanordnung zur mobilen Staubbmessung	23
3.2.2. Durchführung der mobilen Staubbmessungen	23
3.2.3. Messtage in Gießen	27
3.2.4. Messtag in Marburg.....	29
3.2.5. Messtage in Wetzlar	30
3.2.6. Messtage im Bereich der HLUG Messstellen	32
3.2.7. Messungen des HLUG	32
3.3. Statistische Auswertung.....	33
4. ERGEBNISSE	34
4.1. Messungen in Gießen.....	35
4.1.1. Messungen der Partikelanzahl.....	35
4.1.2. Messungen der Massenkonzentration.....	42
4.1.3. Ergebnisse der stationären Staubbmessungen des HLUG in Gießen	48
4.1.4. Zusammenfassende Beurteilung der Staubbkonzentrationen in Gießen	51
4.2. Messung in Marburg.....	52
4.2.1. Messungen der Partikelanzahl.....	52
4.2.2. Messungen der Massenkonzentration.....	55
4.2.3. Messungen des HLUG in Marburg	58
4.2.4. Zusammenfassende Beurteilung der Staubbkonzentrationen in Marburg	61
4.3. Messung in Wetzlar	62
4.3.1. Messungen der Partikelanzahl.....	63
4.3.2. Messungen der Massenkonzentration.....	65
4.3.3. Messungen des HLUG in Wetzlar.....	67
4.3.4. Zusammenfassende Beurteilung der Staubbkonzentrationen in Wetzlar	70
4.4. Vergleich der Staubbelastungen in Gießen, Marburg und Wetzlar	71
4.4.1. Zusammenfassung der Teilchenanzahl.....	75

4.4.2. Zusammenfassung der Massenkonzentration	75
5. DISKUSSION	77
5.1. Toxikologische Bewertung der untersuchten Partikel	77
5.2. Teilchenanzahl	78
5.3. Massenkonzentration	79
5.4. Messungen des HLUG	80
5.5. Einordnung in den aktuellen Zusammenhang	82
5.6. Bedeutung für die Prävention	83
6. ZUSAMMENFASSUNG	86
7. SUMMARY	87
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS:	88
ABBILDUNGSVERZEICHNIS:	90
TABELLENVERZEICHNIS:	92
LITERATURVERZEICHNIS	93
PUBLIKATIONSVERZEICHNIS:	102
DANKSAGUNG	103

1. Einleitung

Die Exposition luftgetragener Partikel in Form von Staub hat besonders im letzten Jahrhundert im Zuge der industriellen Revolution und der damit verbundenen ansteigenden anthropogenen Quellen in der Natur und am Arbeitsplatz drastisch zugenommen (Oberdörster 2005). Der Begriff „Staub“ bezeichnet feste Partikel unterschiedlicher Größe, die eine bestimmte Verweilzeit in einer Gasphase, wie zum Beispiel der Luft aufweisen. Staub ist immer und überall vorhanden, dabei ist er jedoch nur zu einem kleinen Teil sichtbar. Tagtäglich ist der menschliche Organismus Staub unterschiedlicher Größe in Form von natürlichen und synthetischen, granulären wie auch faserförmigen Partikeln ausgesetzt. Feinstäube, die vom Menschen inhaliert werden können, sind dabei von besonderer gesundheitlicher Relevanz und können respiratorische und kardiovaskuläre Erkrankungen zur Folge haben (Schneider et al. 2013, Veras et al. 2010). Über die Atemwege und die Lunge stellt der Respirationstrakt das größte Kontaktorgan des Menschen für inhalierbare Stoffe dar (Castell et al. 2005).

Durch die Aufnahme über die Atemwege können diese ubiquitär vorkommenden Partikel im menschlichen Körper gesundheitliche Schäden verursachen. Aktuelle Auswertungen des Max-Planck-Institutes gehen von ca. 35.000 Todesfällen pro Jahr durch feine Stäube alleine in Deutschland aus, weltweit liegt diese Zahl bei über 3,3 Millionen pro Jahr (Lelieveld, 2015).

Die mechanistischen Zusammenhänge zwischen Staubexposition und den unterschiedlichen resultierenden Erkrankungen der Atemwege sind noch nicht vollständig geklärt. Neben der Partikelgröße gelten auch Partikelanzahl, Partikelmasse, Staubvolumen, Oberflächeneigenschaften und die chemische Zusammensetzung eines Staubes als relevante Einflussfaktoren des Gefahrenpotenzials nach Staubexposition (Oberdörster et al. 2005). Während die Art der Gefahrstoffe das fibrogene oder kanzerogene bzw. sensibilisierende oder chemisch-irritative Potenzial determiniert, bestimmen die Konzentration und die Dauer bzw. Dosis das Gefährdungspotenzial der Stäube.

Die Auswirkungen der Staubpartikel auf den Körper können dabei in Abhängigkeit ihrer Pathophysiologie nach verschiedenen Effekten auf die Gesundheit der Bevölkerung wie chemisch-irritativ, allergisierend, fibrogen und kanzerogen unterschieden werden. Neben diesen Effekten sind weitere, eher technische Differenzierungen möglich.

Ein entscheidender Faktor für die Wirkung der Partikel scheint deren Größe zu sein, da diese für die Deposition in den Atemwegen und damit den Wirkort von besonderer Bedeutung ist. Eine Einteilung der Staubteilchen entsprechend ihrer Ablagerungsorte ist heute üblich.

Eine entscheidende Relevanz für die Pathophysiologie von Partikeln auf die Gesundheit der (arbeitenden) Bevölkerung hat nicht nur die chemische Zusammensetzung der Partikel, sondern auch die Art und Größe der Partikel. So werden Partikel in faserförmige oder granuläre Stäube, ebenso in feine und ultra-feine Nano-Partikel unterschieden. Gerade letztere stellen nicht einzelne solide Teilchen dar, sondern bestehen wie z.B. Rußpartikel aus Agglomeraten nanoskaliger Partikel. Je kleiner die einzelnen Partikel werden, desto größer scheint deren Tendenz zur Zusammenlagerung. Untersuchungen der letzten Jahre konnten zeigen, dass die Agglomerate nach Ablagerung in den unteren Atemwegen wieder in ihre Primärpartikel zerfallen und wegen der damit verbundenen höheren Partikelanzahl sogar eine größere gesundheitliche Gefährdung darstellen als vor ihrer Aufspaltung (Schneider et al 2013). In Tierversuchen (Pott und Roller 2005) korrelierte die Lungentumorrates mit der Partikelanzahl.

Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung von Stäuben ist eine Charakterisierung der Partikel anhand eines einzelnen Parameters nicht ausreichend um eine adäquate Risikobewertung vorzunehmen. Vielmehr sind es neben der Größe und Zusammensetzung auch die Masse, das Volumen und die Anzahl der Partikel, die die Toxizität bestimmen und das Tumorrisiko beschreiben (Schneider 2013). Die Charakterisierung all dieser Eigenschaften der Partikel setzt jedoch sehr aufwändige hochauflösende Elektronenmikroskope mit energiedispersiver Röntgen Mikroanalyse (EDX) voraus.

Die Ermittlung der Staubbelastung in der Atemluft erfolgte bisher meist gravimetrisch mit Bestimmung der Masse des Staubes in Milligramm pro Kubikmeter Atemluft (mg/m^3). In unterschiedlichen Überwachungsbereichen finden jedoch unterschiedliche Messgrößen Verwendung. Im Bereich der Umweltmessungen werden die Partikelmassen der sogenannten PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ -Partikel bestimmt, denen technisch definierte Teilchengrößen (10 bzw. 2,5 μm Partikelgrößen) zugrunde liegen. Im Bereich der Arbeitsplatzüberwachung werden aufgrund der möglichen Eindringtiefe der Partikel in

die Atemwege bzw. Lungen die Stäube in eine einatembare (E-), thoraxgängige (T-), und alveolargängige (A-) Fraktion unterscheiden.

Im Rahmen dieser Arbeit soll anhand von Staubmessungen im Bereich der Umwelt eine Überprüfung der Belastung mit feinen bzw. ultrafeinen Stäuben im Straßenverkehr erfolgen. Neben den beschriebenen massebezogenen Messverfahren wird dabei insbesondere auch die in der Arbeitsmedizin etablierte Bestimmung der Teilchenanzahl eingesetzt. Dieses Vorgehen ist erforderlich, da kleine Partikel und hier insbesondere Nanoteilchen kaum zu einer Massebelastung beitragen. Ein Vergleich beider Methoden erscheint angebracht, wenn einerseits die vorgegebenen massebasierten Grenzwerte der Staubb Belastung durch im Straßenverkehr vorherrschende Dieselrußpartikel weitgehend eingehalten werden (Umweltbundesamt 2016), andererseits laut aktuellen Untersuchungen gut ein Viertel der Todesfälle durch Feinstaubbelastung in Deutschland auf den Straßenverkehr zurückzuführen ist (Lelieveld, 2015).

Das Ziel der Arbeit ist es herauszufinden, ob mit Methoden, die bislang vorwiegend bei Staubmessungen an Arbeitsplätzen etabliert sind, auch in der Umweltüberwachung zusätzliche Informationen gewonnen werden können, um die Belastungen und damit die Gefährdung der Bevölkerung durch inhalierbare Stäube abschätzen zu können. Hierdurch sollte es möglich erscheinen, Maßnahmen zu ergreifen, die das Risiko für Lungentumoren infolge nanoskaliger Staub-Partikel effektiv zu reduzieren.

2. Allgemeine Grundlagen

2.1. Staub – Definition

Als Staub werden feste Partikel bezeichnet, die eine bestimmte Verweilzeit in Gasphasen wie z.B. in der Luft oder der Atmosphäre aufweisen. Die Teilchen können in Abhängigkeit von ihrer Größe und Masse von einigen Stunden bis zu mehreren Tagen in der Gasphase schweben. Allgemein gilt: je höher die Teilchenmasse, desto eher sedimentieren diese. Leichtere Teilchen verbleiben im Allgemeinen länger im Schwebezustand und können damit sogar über große Entfernungen transportiert werden. Staubpartikel unterscheiden sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung aber auch hinsichtlich ihrer Größe und Form. Neben faserförmigen wie zum Beispiel Asbestfasern werden granuläre Stäube unterschieden. Auch die Größe der Partikel wie feine und Ultra-feine bzw. Nanopartikel spielen eine besondere toxikologische Rolle. Kleine Partikel, insbesondere im Bereich einiger Nanometer (nm) bestehen meist nicht nur aus einzelnen, sogenannten Primärteilchen, sondern bilden Zusammenlagerungen lose verbundener Primärteilchen sogenannte Agglomerate oder auch fest verbundene Primärteilchen sogenannte Aggregate. Agglomerate, welche zum Beispiel über "Van-der-Waals-Kräfte" zusammengehalten werden, können durch äußere Einflüssen wieder in ihre Primärteilchen zerfallen.

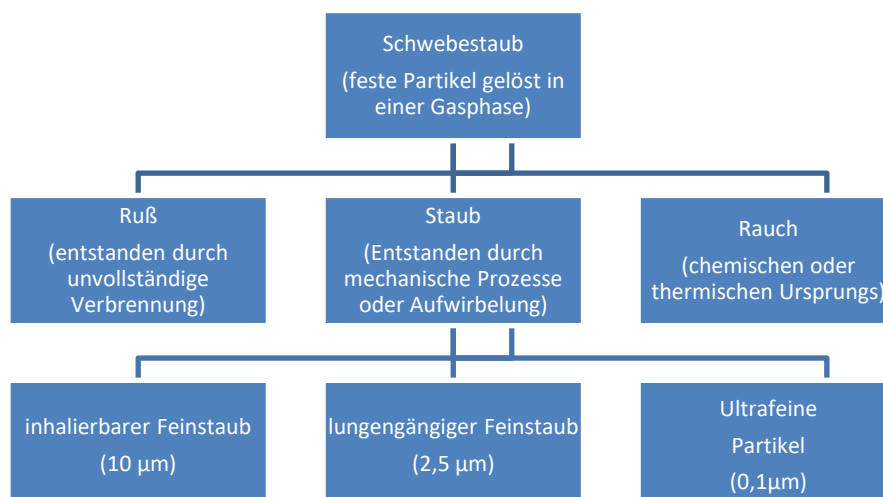


Abbildung 1: Unterteilung verschiedener Stäube nach Ursprung und Partikelgröße unter umwelthygienischen Gesichtspunkten

Um die Wirkung von Stäuben zu beurteilen, muss demzufolge die Partikelgröße berücksichtigt werden. Vom aerodynamischen Durchmesser ist es abhängig, wo die einatembaren Partikel im System der Atemwege und der Lungen deponiert werden.

In Abhängigkeit von der Partikelgröße werden die Stäube klassifiziert (vergleiche Veröffentlichungen des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG 2012):

„Partikelgrößen von 10 µm bis zu 2,5 µm:

Partikel mit einer Größe von etwa 10 bis 2,5 µm Durchmesser verbleiben bereits im Nasen- und Rachenraum oder dringen bis in den oberen Bereich der Bronchien vor. Werden in diesen Bereichen Partikel abgelagert, so erfolgt bereits innerhalb von wenigen Tagen über Schleimsekretionen und mit Hilfe von Flimmerhaaren ein Abtransport der Teilchen in Richtung Kehlkopf. Von dort werden sie ausgehustet oder durch Verschlucken in den Magen-Darm-Trakt überführt.

Partikelgrößen von 2,5µm bis zu 0,1µm:

Die noch feineren Partikel mit Größen von kleiner 2,5 µm bis etwa 1 µm dringen wesentlich tiefer in die Lunge bis in die Regionen der stärker und feiner verästelten Bronchien und Bronchiolen vor. Dort beträgt ihre Aufenthaltsdauer bereits bis zu mehreren Wochen, bevor auch sie über Schleimsekretionen und durch die Flimmerhaare abtransportiert werden. Partikel mit Durchmessern von etwa 1 bis 0,1 µm werden aufgrund ihrer geringen Eigenbeweglichkeit nur zu etwa 20 % im Atemtrakt abgelagert. Im Vergleich zu den größeren oder kleineren Teilchen verbleiben diese Partikel eher im Luftstrom der ein- und ausgeatmeten Luft.

Partikelgrößen unterhalb von 0,1 µm:

Die sehr viel kleineren sogenannten ultrafeinen Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 0,1 µm (kleiner als 100 Nanometer) strömen bis in die Lungenperipherie (Gasaustauschbereich) ein. Dort treffen sie auf die gut durchbluteten Lungenbläschen (Alveolen). Im Alveolarbereich können sich die ultrafeinen Partikel am Gewebe festsetzen.“ Ein Abtransport ist anschließend über den Luftstrom nicht mehr möglich, es bleibt ein lymphogener Abtransport oder eine Phagozytose durch vorhandene Makrophagen. Auch ein Abtransport über die Blutbahnen wird beschrieben.

Eine andere Einteilung resultiert aus den Arbeitsschutzrichtlinien zur Staubbekämpfung an Arbeitsplätzen. Um einen Überblick über die verwendeten Begrifflichkeiten zu gewinnen, ist ein Blick in die Chronik der Staubdefinitionen hilfreich. Die ursprüngliche Unterscheidung der umweltmedizinischen bzw. arbeitsmedizinischen Staubdefinitionen gründete sich auf rechtliche und messtechnische Unterschiede.

Generelles Schutzziel ist es, Arbeitnehmer vor Gesundheitsrisiken durch gesundheitsgefährdende Arbeitsstoffe bzw. Tätigkeiten zu schützen. Aufgrund der hohen sozioökonomischen Bedeutung der Pneumokoniosen insbesondere im Hinblick auf die Silikose und die Asbestose wurden Maßnahmen der Prävention erforderlich. Eine erfolgreiche Prävention der Pneumokoniosen setzt das Ineinandergreifen von Rechtsnormen, technischen und arbeitsmedizinischen Schutzmaßnahmen voraus. Zur Vermeidung von Staublungenerkrankungen (Pneumokoniosen) war der Staubanteil der bis in die Alveolen gelangten Staubfraktion besonders relevant. Dies liegt daran, dass in den Alveolen keine mukoziliäre Reinigungsfunktion erfolgt und die Partikel über Alveolarmakrophagen verdaut und lymphogen abtransportiert werden müssen. Infolge der hohen Biobeständigkeit der Stäube kommt es zum Zerfall der Makrophagen und zu entzündlichen Gewebsreaktionen, die zu einer interstitiellen Bindegewebsvermehrung in der Lunge führten. 1971 wurden im Arbeitsschutz erstmals einheitliche und rechtlich verbindliche Bestimmungen für diese alveolengängigen A-Staubfraktion aufgestellt. Zur Prävention der chronischen Bronchitis waren auch die größeren Staubfraktionen mit Deposition der Partikel in den Atemwegen relevant. 1972 folgte dies für den einatembaren Staub, damals noch unter dem Begriff „Gesamtstaub“. Die Festlegung der hier genannten Stäube erfolgte anhand der möglichen Eindringtiefe der Staubpartikel in die oberen und unteren Atemwege des Menschen.

Im Europäischen Recht wurde 1993 im Rahmen der DIN EN 481 die Fraktionen des E-, T-, und A-Staubes definiert. Die einatembaren Partikel der E-Fraktion entsprechen allen Partikeln, welche eingeatmet werden können. Partikel geringerer Größe, die nicht in den oberen Atemwegen abgeschieden werden, gelangen weiter in das Bronchialsystem und werden als thoraxgängige (T)-Fraktion bezeichnet. Noch kleinere Partikel gelangen in die Alveolen (A) und werden demzufolge als A-Fraktion bezeichnet.

In Deutschland wurden die Begriffe „A-Staub“ und „E-Staub“ erstmals mit der Neudefinition der Staubfraktionen im Rahmen der Umstellung auf die "Technischen Regeln für Gefahrstoffe" (TRGS 900) im Jahr 1994 verwendet. Zehn Jahre später wurde ein „allgemeiner Staubgrenzwert“ (ASGW) für die einatembare E-Fraktion aufgestellt, die letzte Anpassung der geltenden Grenzwerte für die Staubfraktionen erfolgte im Jahr 2014. Ziel der Grenzwerte (MAK-Werte, maximale Arbeitsplatz Konzentration), die von der „Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe“ der DFG aufgestellt werden, soll die Vermeidung unspezifischer Wirkungen auf die Atmungsorgane durch eine Partikelbelastung sein. Hierfür wird von einer potentiellen Belastung über 8 Arbeitsstunden am Tag und 40 Jahren ausgegangen (DFG 2014).

Als „unspezifischen Wirkungen“ einer vermehrten Partikel Deposition in den Bronchien werden beispielsweise die Folgen einer Überlastung der mukoziliären Clearance mit chronisch entzündlichen Veränderungen der Bronchialschleimhaut und in deren Folge obstruktive Ventilationsstörungen angesehen.

Ein alternatives Model zur Charakterisierung von Stäuben in der Luft wurde 1987 durch die amerikanische Umweltbehörde EPA (Environmental Protection Agency) aufgestellt. Hier wurde erstmals der Begriff „Feinstaub“ verwendet. Ziel war es, eine technisch definierte Größe für die Teilchen festzulegen, welche für den Menschen ohne Hilfsmittel nicht mehr sichtbar sind und den einatembaren Anteil des Staubes darstellt. Die Größe dieser Teilchen wurde als PM₁₀-Fraktion festgelegt (vgl. Tabelle 1).

Die technische Definition der PM₁₀- Fraktion stellt dabei jedoch keine scharfe Grenze der Teilchengröße bei einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm dar, unterhalb derer alle Partikel in die Messungen eingehen und oberhalb derer keine Partikel gezählt werden. Vielmehr wird das dynamische Abscheideverhalten der oberen Atemwege nachempfunden. Dies bedeutet, nur jeder zweite Partikel einer Größe von 10µm kann die Messöffnung passieren, die übrigen werden abgeschieden (Graf, 2007). Dies soll das Abscheideverhalten in den Atemwegen möglichst realistisch wiedergeben, da auch hierbei unterschiedlichen Partikelgrößen verschiedene Anteile der jeweiligen Partikel einer Größe eliminiert werden.

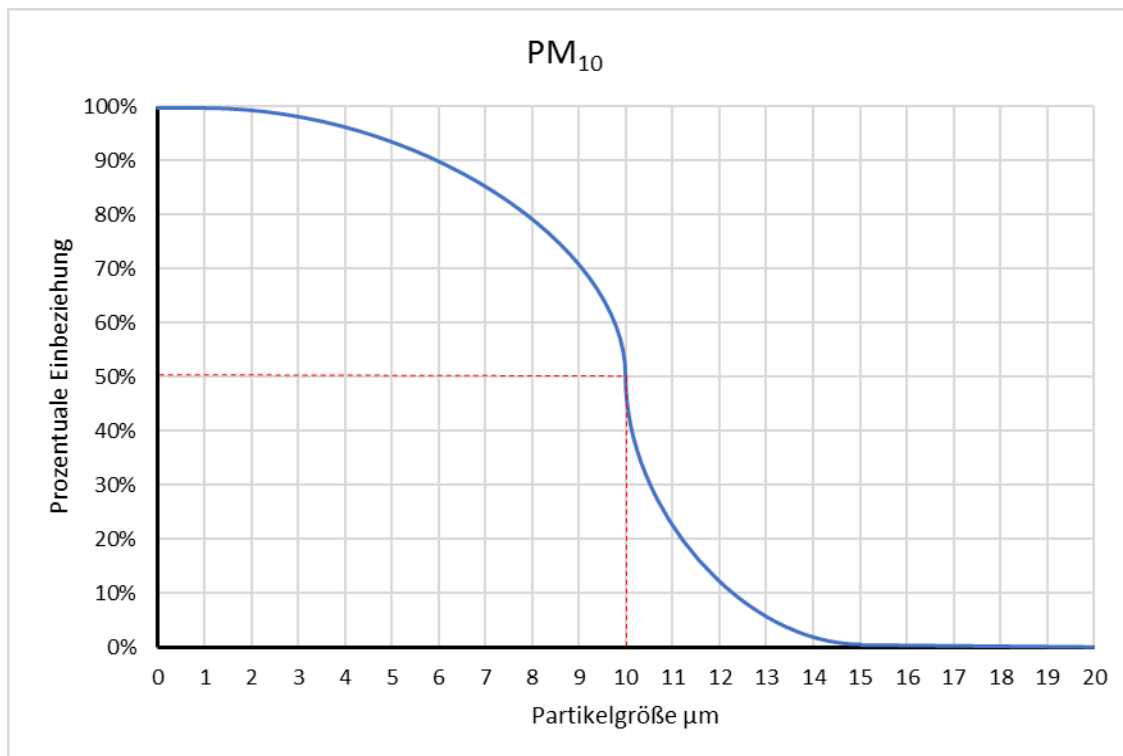


Abbildung 2: Grafische Darstellung der als PM₁₀ einbezogenen Partikel. Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als 1 µm werden vollständig in die Messung mit einbezogen, bei größeren Partikeln wird ein gewisser Prozentsatz gewertet, der mit zunehmender Partikelgröße abnimmt und bei einer Partikelgröße von ca. 15 µm schließlich 0 % erreicht. Für die Partikel mit einer Größe von 10 µm wird dann eine Abscheidewahrscheinlichkeit von genau 50% angenommen, hier verdeutlicht durch die roten Linien

Im europäischen Umweltschutz wurde die durch die EPA definierte Größe der PM₁₀-Fraktion 1999 in der Richtlinie 1999/30/EG übernommen und wird seitdem zusammen mit der PM_{2,5}-Fraktion verwendet. PM_{2,5} wurde erstmals 1997 genutzt, und beschreibt Teilchen, die ein Durchmesser von 2,5 µm haben. Diese Definition wurde ergänzt, nachdem die hohe Relevanz dieser Partikel erkannt wurde, die sich zum einen auf der langen Verweilzeit der Partikel in der Atmosphäre begründet, zum anderen auf die Alveolargängigkeit, also die Möglichkeit bis tief in die unteren Atemwege vorzudringen. Auch hier beschreibt der Wert, technisch analog zur PM₁₀-Fraktion diejenigen Partikel, die einen größenselektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm eine Abscheidewahrscheinlichkeit von 50% aufweist.

Als weitere Größe wurde $PM_{0,1}$ definiert. Hierbei handelt es sich um Partikel mit einem Größendurchmesser von 100 Nanometern ($0,1\mu m$) oder weniger. $PM_{0,1}$ werden üblicherweise als ultrafeine Partikel oder Nanopartikel bezeichnet. Diese Partikel können über das Lungengewebe direkt in den Blutkreislauf aufgenommen werden und sich von dort im Körper ausbreiten. Sie haben einen hohen Anteil an der Gesamtzahl der Teilchen in der Luft, tragen jedoch nur wenig zur entsprechenden Masse bei.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Größen und hauptsächlichen Anwendungsbereiche der genannten Messparameter (modifiziert nach. AfA 2008). (Die Fraktion „Ultrafein“ bezieht sich hier entsprechend der Kennzeichnung auf den Anwendungsbereich des Umweltschutzes)

Staub-Fraktion	Benennung	Partikelgröße	Anwendungsbereich
E	einatembarer Staub	$< 100 \mu m$	Arbeitsschutz
T	thoraxgängiger Staub	$< 10 \mu m$	Arbeitsschutz
PM_{10}	Particulate Matter, atembarer Staub	$< 10 \mu m$	Umweltschutz
A	alveolengängiger Staub	$< 4 \mu m$	Arbeitsschutz
$PM_{2,5}$	Particulate Matter, inhalierbarer Staub	$< 2,5 \mu m$	Umweltschutz
Ultrafein	Ultrafeinstaub	$\leq 0,1 \mu m$	Umweltschutz

Tabelle 1 fasst die umwelt- und arbeitsschutzrelevanten Staubdefinitionen zusammen. Vergleicht man die entsprechenden Einteilungen zwischen den in der Arbeits- und Umweltmedizin gebräuchlichen Größen, so wird deutlich, dass die T-Staubfraktion der des PM_{10} weitestgehend entspricht.

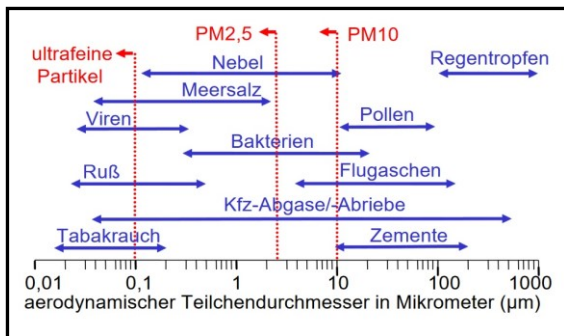


Abbildung 3: Größenbereiche von Partikeln in der Atmosphäre (nach HLUg 2012)

Einen weiteren grundlegenden Einfluss auf die Wirkung von Staubpartikeln in der Lunge haben neben dem Ablagerungsort die Art und Menge der deponierten Partikel. Wie in Abbildung 3 erkennbar ist, bestehen die Partikel der zuvor genannten Größen zum beträchtlichen Teil aus Kfz-Abgasen, Rauch, Ruß sowie einigen Teilchen biologischen Ursprungs.

Den verschiedenen Partikeln können dabei diverse Eigenschaften im menschlichen Körper nachgewiesen werden. Neben chemisch irritativen, allergisierenden, fibrosierenden und kanzerogenen Partikeln sind hier auf Grund ihrer Wirkung insbesondere die Gruppe der granulär biobeständigen Stäube (GBS) zu nennen, denen auch Rußpartikel zugeordnet werden müssen. Ursprünglich als A-Fraktion des allgemeinen Staubgrenzwertes bezeichnet, stellte sich in den letzten Jahren eine bedeutende Rolle dieser GBS bei der Entstehung von Lungentumoren heraus.

Granulär biobeständige Stäube rückten in den Fokus, nachdem Studien intratrachealer Staubapplikationen (Muhle et al. 1991) an Ratten gezeigt hatten, dass auch durch sogenannte „inerte“ Stäube im Konzentrationsbereich des allgemeinen Staubgrenzwertes der A-Fraktion adverse Effekte eintreten konnten, welche bis hin zur Tumorgenität reichten. Gleichzeitig wurde ein Schwellenphänomen beschrieben, d.h. wurde eine bestimmte Schwelle an Partikeln nicht überschritten, war keine tumorinduktive Wirkungen zu erwarten. Die besondere Bedeutung dieser Erkenntnisse resultiert aus der Tatsache, dass die am Versuchstier gewonnenen Erfahrungen im Hinblick auf die potentiell krebserzeugende Wirkung von Partikeln auf den Menschen übertragen werden können (DFG 2012).

Eine vollständige Auflistung welche Stoffe zur Gruppe der GBS zuzuordnen sind existiert nicht. Die Einordnung von Partikeln als granulär biobeständig erfolgt vielmehr anhand von Eigenschaften, durch welche diese Teilchen definiert werden. Sie sind alveolengängig, schwer oder gänzlich unlöslich in biologischen Flüssigkeiten und besitzen keine eigene krebserzeugende, fibrogene oder weitere systemtoxische Wirkungen, also keine stoffspezifische Toxizität. Ihre Wirkung kommt vielmehr durch einen Partikeleffekt im alveolären Bereich der Lunge zustande (DFG 2012).

Dieser hinter dem Partikeleffekt der GBS stehende pathophysiologische Mechanismus konnte bereits vor über 25 Jahren durch Muhle et al. (1991) nachgewiesen werden. Der Effekt der GBS setzt ein, wenn die Anzahl der deponierten Staubpartikel die natürlichen Reinigungsmechanismen des Körpers im Bereich der unteren Atemwege (mukoziliäre Clearance) übersteigt. Hier spricht man vom sogenannten „Overload“. Wird dieser Overload erreicht, resultiert eine Entzündungsreaktion mit konsekutiver Ansammlung von Makrophagen, Granulozyten, Lymphozyten sowie verschiedensten Zytokinen am Ort der Überladung. Aktivierte Makrophagen nehmen die Staubpartikel auf und versuchen über die Bildung reaktiver Sauerstoffverbindungen, sogenannten „ROS“ (reactive oxygen species) die Fremdpartikel abzubauen. Sowohl durch ROS als auch durch die allgemeinen Entzündungsreaktionen (Zytokine), kommt es zu einer Induktion oxidativer DNA-Schäden. Diese wiederum können in Mutationen resultieren, welche an den Epithelzellen des Alveolar- oder Bronchialgewebes eine Tumorentstehung initiieren. Aufgrund dieser pathophysiologischen Mechanismen wurden die GBS der „MAK-Kategorie 4“ zugeordnet, und damit Stoffen, bei denen ein nicht-genotoxischer Wirkungsmechanismus im Vordergrund steht und genotoxische Effekte bei Einhaltung des MAK-Wertes keine oder nur eine untergeordnete Rolle spielen (DFG 2012). Gleichzeitig konnte so für die GBS bezogen auf Stäube der Dichte 1g/cm^3 ein Grenzwert von $0,3\text{ mg/m}^3$ eingeführt werden. Die Gültigkeit dieses Grenzwertes bezieht sich auf GBS, nicht jedoch auf andere Stäube mit fibrogenen, kanzerogenen oder sensibilisierenden Eigenschaften. Die ultrafeinen Partikel und damit sämtliche Nanopartikel wurden ebenso von diesem Grenzwert ausgenommen.

Neben den bisher beschriebenen Faktoren Größe und Art der lungengängigen Partikel gibt es weitere Eigenschaften, die eine Bedeutung für die toxikologische Risikobewertung aufweisen. So konnten Schneider et al. 2013, Rödelberger et al. (2003)

sowie Pott und Roller (2003) zeigen, dass das kanzerogene Potenzial z.B. für GBS insbesondere durch die Partikelanzahl sowie die Partikeloberfläche determiniert wird. Aber auch das Volumen und die spezifische Masse scheinen einen Einfluss auf die Kanzerogenität zu haben.

Die Partikelanzahl wird verändert durch das Zusammenlagern von kleineren Primärpartikeln insbesondere bei Nanopartikeln zu größeren Agglomeraten und Aggregaten mit damit verbundener geringerer Partikelanzahl. Bei der toxikologischen Beurteilung muss berücksichtigt werden, dass die größeren Agglomerate wieder in ihre Primärpartikel zerfallen und damit eine größere Oberfläche mit Kontakt zu den Zielzellen auf die Bronchialschleimhaut resultiert. Niermeier und Walter zeigten 2015, dass z.B. bei Dieselruß mit abnehmender Größe der Primärpartikel deren Neigung zu Agglomeration durch Adhäsionskräfte (z.B. van der Waals-Kräfte) zunimmt. Mittels Transmissionselektronenmikroskopie konnten gezeigt werden, dass Dieselruß aus mehreren hundert Primärpartikeln bestand und dabei Agglomeratsgrößen von über 1 μm erreichten (Rödelsperger 2007, Schneider et al., 2013).

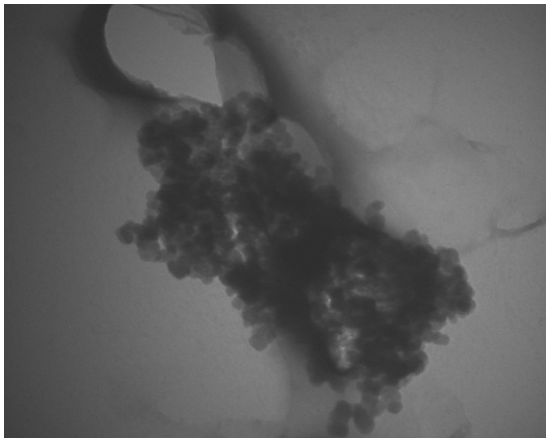


Abbildung 4: TEM-Aufnahme von Dieselrußpartikeln in einer Vergrößerung mit dem Faktor 40.000. Zu erkennen ist ein Agglomerat aus einer Vielzahl kleinerer Primärpartikel mit einer ungefähren Ausdehnung von 0,8 μm (aus Niermeier und Walter, 2015)

Gelangen diese Agglomerate in die Atemwege, zerfallen diese in die ursprünglichen einzelnen Primärpartikel. Infolge der veränderten Oberfläche wird die Wirkung durch

diesbezügliche Stäube modifiziert (Rödelsperger et al. 2007). Nanopartikel durchdringen die Lungen und können somit auch ihre Wirkung auf andere Organsysteme wie Herz, Blutgefäße oder eine veränderte Blutgerinnung entfalten.

Um Agglomerate kleinerer Partikel messtechnisch zu identifizieren und damit verwertbare Einschätzungen über Art und Ausmaß der vorhandenen Belastung machen zu können, sind Untersuchungen mittels Transmissionselektronenmikroskop notwendig. Eine Untersuchung lediglich der Partikelmasse oder Partikelanzahl kann Agglomerate von einzelnen schweren beziehungsweise großen Partikeln nicht unterscheiden.

2.2. Dieselrußpartikel

Abgase, die durch den Betrieb von Fahrzeugen mit Dieselmotoren entstehen, werden als Dieselmotoremissionen (DME) bezeichnet. Die Staubfraktion enthält nanoskalige Partikel bestehend aus verschiedenen Stoffen, die in Ihrer Zusammensetzung je nach Art des Dieselmotors, der Betriebsweise, dem eingesetzten Kraftstoff und der Art der Abgasreinigung variieren (Gebel 2017). Den Kern dieser Teilchen bilden Dieselrußpartikel, also unverbrannte und feste Kohlenstoffpartikel aus Dieseldieselkraftstoffen. Gebunden an diese Kerne elementaren Kohlenstoffs (elementar Carbon, EC) finden sich weitere biolösliche Stoffe wie z.B. organische Kohlenstoffverbindungen oder polyzyklische Kohlenwasserstoffe. Weiterhin enthalten Dieselmotoremissionen gasförmige Stoffe wie z.B. Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenstoffdioxid.

Bei der Bewertung dieser verschiedenen Gefahrstoffe konnte eine Tumorinduktion allein durch die gasförmigen Anteile der DME wie Stickstoffoxide oder Kohlenstoffoxide bereits vor mehr als 20 Jahren ausgeschlossen werden. In Tierversuchen haben die gasförmigen Anteile der Dieselmotor Emissionen keine proliferativen Wirkungen mit letztendlicher Tumorinduktion ausgelöst (Mauderly et al. 1987). Für die kanzerogenen Effekte der DME wurden damit die Dieselrußpartikel mit ihren Kernen aus elementarem Kohlenstoff verantwortlich gemacht (WHO 2012).

DME sind Partikel aus Kohlenstoff, die der Definition der zuvor genannten GBS entsprechen. Dieses Erkenntnis in Kombination mit dem Wissen um den zuvor beschriebenen Partikeleffekt, welcher für Dieselrußpartikel als Teil der granulär biobeständigen Stäube bekannt ist, ermöglichte es einen Grenzwert für DME festzusetzen. Unterhalb dieses Grenzwertes kann es damit zu keiner andauernden Entzündungsreaktionen durch einen Partikeleffekt kommen, welche in letzter Konsequenz zu einer Tumorentstehung führen kann (Gebel 2017).

2.3. Entstehung von Stäuben

Stäube, insbesondere sogenannte Feinstäube, sind ubiquitär nachweisbar. Dabei entstehen diese kleinen und kleinsten Partikel sowohl auf natürliche Art und Weise als auch anthropogen, also vom Menschen verursacht. Zu den natürlichen Quellen gehören unter anderem Waldbrände, Vulkanausbrüche, Bodenverwitterung sowie Nebel.

Anthropogene Stauberzeuger sind beispielsweise Industrieanlagen oder Heizsysteme mit ihren unvollständigen Verbrennungsprozessen. Auch Landwirtschaft, Straßenverkehr und Flugverkehr tragen zur Entstehung von Staubpartikeln der PM₁₀-Fraktion bei. Dabei kommt insbesondere dem Straßenverkehr eine entscheidende Rolle zu. In absteigender Menge sind hier neben Abgasemissionen mit (Diesel-)Rußteilchen und Abrieb von Bremsen und Reifen auch die Aufwirbelungen von Stäuben zu nennen.

Die Menge des in Deutschland erzeugten Feinstaubes wurde vom Bundesumweltministerium bereits 2001 mit ca. 205.000 Tonnen/Jahr beziffert. Dabei verursacht der Straßenverkehr mit ca. 42.000 Tonnen direkt nach der Industrieproduktion mit ca. 72.000 Tonnen die zweitgrößte Menge an Feinstaub. Es folgen Privathaushalte mit 33.000 Tonnen und die Landwirtschaft mit ca. 15.000 Tonnen pro Jahr.

Die Zusammensetzungen der unterschiedlichen Staubfraktionen sind dabei nicht homogen. So steigt beispielsweise der Anteil des Kfz-Verkehrs als Verursacher mit abnehmendem aerodynamischen Durchmesser der betrachteten Teilchens deutlich an (Tabelle 2).

Tabelle 2: Herkunft der Partikel entsprechend ihres aerodynamischen Durchmessers (HLUG2012)

Ursprung	PM₁₀	PM_{2,5}	PM_{0,1}
Kfz-Verkehr	23 %	37 %	53 %
Industrieproduktion	24 %	21 %	16%
Verbrennungsprozesse	33 %	35 %	22 %
andere Quellen	20 %	7 %	9 %

2.4. Überwachung der Staubbelastung in Hessen

Zur Prävention von Atemwegs- und Lungenerkrankungen durch Stäube im Umweltbereich werden an vielen Stellen Messungen der Staubkonzentration durchgeführt. In Hessen wird die Aufgabe der Überwachung der Luftqualität durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) übernommen (seit 2016 HLNUG: Hessisches Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie). Um dieser Aufgabe nachkommen zu können, werden umfangreiche Daten zu Luftschadstoffen sowie deren Emissionen, Immissionen und Wirkungen erfasst. Hierfür wird durch das HLUG an siebenunddreißig Orten (Stand 01/2015) Feinstaub und weitere Parameter gemessen.

Entsprechend der "Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates" sind die Messstellen so festzulegen, dass einerseits die gewonnen Daten aus den Bereichen der Ballungsgebiete sowohl zeitlich als auch örtlich die höchsten relevanten Konzentrationen durch Staubbelastungen aufweisen. Andererseits sollen für die Gebiete, die außerhalb dieser Ballungsräume liegen Konzentrationen nachgewiesen werden können, die als allgemein repräsentativ für die Belastung in weniger strukturstarken Gebieten angesehen werden können (EP 2008). Diese allgemeine Beschreibung wurde dahingehend weiter präzisiert, dass konkrete Mindestflächen der zu messenden Bereiche genannt wurden.

Die Messstationen in Hessen wurden so positioniert, dass laut HLUG mit maximalen Abständen von 40 km bis 60 km zwischen den einzelnen Messstationen eine der Anforderung entsprechende flächendeckende Immissionsüberwachung sichergestellt

werden kann (HLUG 2012). Dabei wird zwischen sechzehn städtischen, zehn ländlichen und elf Messpunkten an Verkehrsschwerpunkten unterschieden (vgl. Abbildung 5).

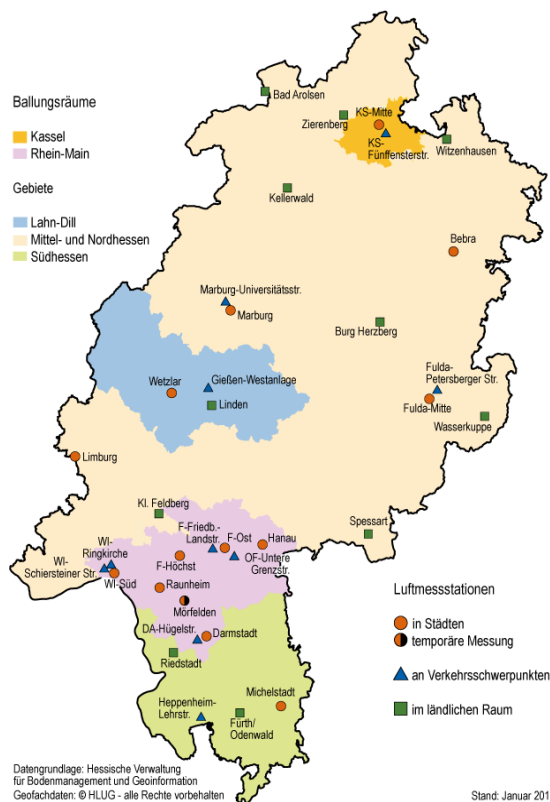


Abbildung 5: Verteilung der Messstellen des Hessischen Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (HLUG 2015)

Die Staubkonzentrationen werden messtechnisch über die PM_{10} -Fraktion erfasst. In den stationären Messstellen des HLUG erfolgt eine rein gravimetrische Bestimmung der Partikel. Eine Bestimmung nach weiteren Qualitäten wie z.B. Teilchenanzahl oder Dichte der Partikel kann aufgrund des damit verbundenen größeren apparatetechnischen sowie erforderlichen Personalaufwandes nicht vorgenommen werden. Die PM_{10} -Fraktion des Staubes wird über jeweils fünf Sekunden ermittelt und die Messdaten als Halbstundenmittelwerte veröffentlicht.

2.5. Feinstaub im Umweltschutz

1999 legte die Europäische Union mit der Luftqualitätsrichtlinie 1999/30/EG erstmals Grenzwerte für die Staubmenge in den europäischen Mitgliedsstaaten fest. Dabei wurde

die bisher übliche PM₁₀-Fraktionsdefinition übernommen. Vorgesehene Verschärfungen der Grenzwerte im Verlauf der Jahre wurden durch die Richtlinie 2008/50/EG zum Teil wieder entschärft. Aktuell (Stand 01/2018) gelten europaweit folgende Grenzwerte:

1. Der einzuhaltende Tagesmittelwert für PM₁₀ liegt bei maximal 50 µg/m³. Überschreitungen dieses Wertes sind maximal 35 mal pro Jahr zugelassen.
2. Der einzuhaltende Jahresmittelwert für PM₁₀ liegt bei 40 µg/m³.
3. Der seit 2010 geltende Jahresmittelwert von 25 µg/m³ für PM_{2,5} ist seit 01/2015 verbindlich einzuhalten. Eine Absenkung auf 20 µg/m³ ist für 2020 geplant.

Zusätzlich wurde festgelegt, dass bei Überschreitung der Grenzwerte entsprechend der Richtlinien 96/62/EG, 1999/30/EG und 2008/50/EG ein Luftqualitätsplan erstellt werden muss. Ziel dieser Regelung soll es sein, Maßnahmen zu ergreifen, die zu einer deutlichen Verbesserung der Luftqualität führen. Dies kann durch die Errichtung von Umweltzonen erfolgen, wie es z.B. in vielen deutschen Großstädten seit 2008 praktiziert wird. Zurzeit sind auf diese Weise 55 der aktuell bestehenden 56 Umweltzonen (UBA 12/2017) nur mit vorhandener „grüner Plakette“, entsprechend der EURO Schadstoffnorm 4 (BMJV 2006) befahrbar, allen übrigen Fahrzeugen ist die Einfahrt in die entsprechenden Schutzzonen untersagt.

In aktueller Diskussion befindet sich zudem die Einführung einer weiteren Kennzeichnung entsprechend der EURO Schadstoffnorm 6 („blaue Plakette“) welche weitere umfangreiche Fahrverbote für Kraftfahrzeuge außerhalb dieser Norm (Dieselfahrzeuge unterhalb der EURO Norm 6 und Benzinser unterhalb der EURO Norm 3) mit sich zögen. Mit Düsseldorf und Stuttgart wollen erste deutsche Städte Fahrverbote in bestimmten Bereichen für Autos außerhalb dieser Norm (in Abhängigkeit von ausstehenden Gerichtsentscheidungen im ersten Quartal 2018) zeitnah umsetzen (Stand 12/2017).

Deutlich strenger als die europäischen Grenzwerte sind die Grenzwerte anderer Staaten. So hat die amerikanische Gesundheitsbehörde bereits 2013 die PM_{2,5} Grenzen für die Vereinigten Staaten auf 12 µg/m³ festgelegt. Auch die Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfiehlt deutlich niedrigere Jahresmittelwerte von 20 µg/m³ für PM₁₀ beziehungsweise 10 µg/m³ für die PM_{2,5}-Fraktion.

Im Zusammenhang mit den genannten Grenzwerten veröffentlichte zuletzt die Europäische Umweltagentur in ihrer Studie „Die Umwelt in Europa: Zustand und Ausblick“ (EUA 2015) die Zahl von ca. 348.000 vorzeitigen Sterbefällen innerhalb der EU-Staaten durch die Auswirkungen von Stäuben, die der PM_{2,5}-Fraktion zuzuordnen sind. Trotz eines Rückganges der Feinstaubbelastung um ca. 20% zwischen den Jahren 2000 und 2010 sinkt die Lebenserwartung eines jeden Europäers damit um bis zu neun Monate (EUA 2015). Weitere Daten der ESCAPE Studie (European Study of Cohorts for Air Pollution Effects) zeigen ein erhöhtes Risiko für Schlaganfälle (19%) sowie koronare Ereignisse (13%) bei einem um 5 µg/m³ höheren Wert von PM_{2,5} (Hoffmann et al., 2015). Diese Erkenntnisse sind jedoch nicht neu. Bereits 2004 konnte gezeigt werden, dass auch ein Anstieg der Staubkonzentration um 10 µg/m³ die Gesamtmortalität um 0,5% erhöht (Peng et al., 2004). Studien aus dem Jahr 2009 zeigten, dass die Lebenserwartung um 0,6 Jahre zunimmt, wenn die langfristige PM₁₀-Konzentration um 10 µg/m³ abnimmt (Pope et al., 2009). Dies weist auf die besondere Prävention mit der Erfordernis von Staubbeminderungsmaßnahmen hin.

2.6. Ziel der Arbeit

Aktuell ist im Bereich der Umweltüberwachung die Messung der Parameter PM₁₀ und PM_{2,5} etabliert. Dabei werden durch die beauftragten Landesämter ausschließlich gravimetrische Testverfahren angewendet, ohne dass die Partikel auf weitere gesundheitsrelevante Qualitäten wie Partikelanzahl und Oberfläche untersucht werden. Das Ziel dieser Arbeit ist es, herauszufinden ob die Überwachung weiterer Qualitäten der Stäube zusätzliche Informationen zur Abschätzung von Gesundheitsgefahren erbringen kann. Umweltmedizinisch sollte daher die Belastung der Bevölkerung im und durch den Straßenverkehr analysiert werden. Ein Schwerpunkt dieser Untersuchung liegt dabei auf der Messung der in anderen Bereichen bereits etablierten Partikelanzahl sowie des Weiteren im Bereich des Gesundheitsschutzes der arbeitenden Bevölkerung etablierten Messungen der alveolengängigen (A-), einatembaren (E-) und thoraxgängigen (T-) Staubfraktion.

Hierdurch sollte es möglich sein, das Risiko für die Bevölkerung insbesondere durch diese nanoskaligen Stäube wie Dieselruß besser abzuschätzen. Mit einer verbesserten

Überwachung wäre es zudem möglich zielgerichtete Maßnahmen zu ergreifen (z.B. Anpassung der aktuellen Umweltzonen bzw. Fahrverbote), um das Risiko für staubbedingte Erkrankungen zu reduzieren.

3. Material und Methode

3.1. Material

Messungen der Teilchenanzahl

3.1.1. Der Kondensationskernzähler CPI 3007

Der Kondensationskernzähler (Condensation Particle Counter der: CPI) Modell 3007 der Firma TSI erlaubt es, quantitativ die Teilchenanzahl/cm³ in einem Bereich von 1 bis 100.000 bzw. im Modus „Absolutdruck“ bis 500.000 Teilchen/cm³ - sowohl fest als auch flüssig - in einem Größenbereich von 0,01 bis >1 µm zu registrieren (Rödelsperger et al. 2007). Die Möglichkeit des Betriebes mit einem Verdünner wurde bei den durchgeführten Messungen nicht genutzt, da keine Werte jenseits des oben angegebenen Messbereiches zu erwarten waren.

Bei der Messung der Teilchenanzahl werden Partikel im Bereich einer Größe von 0,01 bis 1,0 µm quantitativ erfasst. Dabei wird bei der Teilchenzahl pro cm³ Luft keine Aussage getroffen, welche Teilchen - die sich noch um den Faktor einhundert in ihrem Durchmesser unterscheiden können - in welcher Häufigkeit vorkommen. Agglomerate kleinerer Partikel werden als einzelne Teilchen registriert, unabhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung oder der Anzahl ihrer Primärpartikel. Dementsprechend wird einer möglichen Vielzahl kleinster zusammenhängender Teilchen, welche bis tief in die Atemwege transportiert und in der Lungenflüssigkeit wieder in ihre einzelnen Primärpartikel aufgespalten werden können, die gleiche Wertigkeit zuteil wie einem einzelnen größeren Teilchen. Auch chemische Eigenschaften der Partikel bleiben unberücksichtigt.

Ermittlung der Staubmasse

3.1.2. Die Staubmesseinrichtung Respicon TM

Das Respicon TM Staubsammel und -messgerät der Firma Helmut Hund GmbH in Wetzlar, erlaubt es, die Massenkonzentration des E-, des T- und des A-Staubes aus der Beaufschlagung dreier zugeordneter Filter zu bestimmen und während dieser Probenahme durch Streulichtmessungen auch die Konzentrationsverläufe dieser drei

Fraktionen zu registrieren. Der Bereich der erfassten Teilchengrößen lässt sich dabei für die einatembare E-Staubfraktion mit Teilchen einer Größe $\leq 100 \mu\text{m}$ angeben, für die thoraxgängige T-Staubfraktion $\leq 10 \mu\text{m}$ und für die alveolengängige Fraktion des A-Staubes mit $\leq 4 \mu\text{m}$.

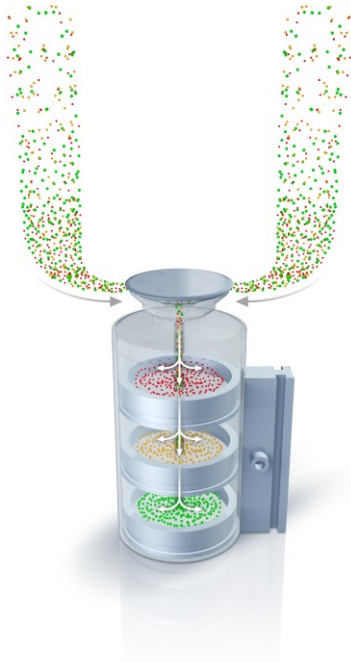


Abbildung 6: Schematischer Aufbau des Respicon TSI (Firma Hund 2017) zur Ermittlung von alveolengängigem, thoraxgängigem und einatembarem Staub. Die Menge der angesaugten Luft (Q) beträgt $3,11 \text{ l/min}$ und unterteilt sich in die Fraktionen $Q_1 = 2,66 \text{ l/min}$ (rot) , $Q_2 = 0,33 \text{ l/min}$ (gelb) und $Q_3 = 0,11 \text{ l/min}$ (grün)

Die drei optischen Messkammern zur Streulichtmessung werden mit Infrarot-Lasern einer Wellenlänge von 780 nm bei 5 mW betrieben. Die untere Nachweisgrenze für Partikel einer Größe von $1 \mu\text{m}$ ergibt sich bei $0,005 \text{ mg/m}^3$, Konzentrationen unterhalb der Nachweisgrenze werden bei der Auswertung mit $0,005 \text{ mg/m}^3$ angegeben. Die beiden virtuellen Impaktoren führen zu einer Anreicherung der T- und der E-Fraktion und gleichen so die Unterschiede im Streulichtverhalten der drei Staubfraktionen annähernd aus. Die Kalibrierung der Streulichtmessungen ist zunächst mit Standardwerten von 20 mV/mg/m^3 für die A-Fraktion, 18 mV/mg/m^3 für den T-Staub, 13 mV/mg/m^3 für den E-Staub vorgegeben. Diese Werte können jedoch durch eine Kalibrierung anhand der Massenkonzentrationsbestimmung aus der Beaufschlagung der zugehörigen drei Filter

ersetzt werden. Bei einer für die Beaufschlagung des Filters angenommenen Nachweisgrenze von ca. 20 µg wird die Nachweisgrenze der Streulichtmessung von 0,005 mg/m³ erst bei einer für den A-, T- und E-Staub unterschiedlichen Probenahmedauer von 2,5, 20 und 60 Stunden erreicht (Rödelsperger et al. 2007). Da für die Messungen ein deutlich kürzerer Zeitrahmen geplant war, wurde dies im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Messung der Massenkonzentrationen erfolgt in Hinblick auf die so genannten A- T- und E-Staubfraktionen, also die „alveolengängigen“, die „thorakalen“ und die „inatembaren“ Stäube. Die T-Fraktion stimmt dabei in ihrer Dimension mit einer Größe der Umweltüberwachung, hier dem PM₁₀ näherungsweise überein. Die Fraktion des A-Staubes liegt in ihrem Größenbereich bis zu 60% über dem PM_{2,5}.

3.2. Umweltmessungen

Durchführung der mobilen Staubmessungen in Gießen, Marburg und Wetzlar

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Umweltmessungen im Straßenverkehr dreier mittelhessischer Städte Gießen, Marburg und Wetzlar mit ca. 50.000 bis 80.000 Einwohnern durchgeführt. Dabei erfolgten mobile Messungen in Bereichen mit unterschiedlicher Belastung durch Kraftfahrzeuge.

Als Qualitätsmerkmale für die Messungen sollen dabei insbesondere die Reproduzierbarkeit im zeitlichen Verlauf, die Größenordnung der Messwerte sowie die Sensitivität gegenüber einzelnen Belastungsspitzen gelten. So sollte bei vergleichbarem Verkehrsaufkommen vor Ort sichergestellt werden, dass zuverlässig die lokal entstandene Partikelbelastung durch den Kfz Verkehr dargestellt werden und andere regionale Faktoren wie Witterung, Industrie- oder Hausbrand die Messergebnisse nicht dominieren.

Die hierdurch gewonnenen mobilen Staubmessergebnisse sollten mit den Messergebnissen zur Feinstaubbelastung der Umweltbehörde des hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) verglichen werden. Letztere lagen jeweils direkt an oder in unmittelbarer Nähe der eigenen Messstrecken.

3.2.1. Geräteanordnung zur mobilen Staubmessung

Zielparameter der durchgeführten Messungen waren zum einen die Masse der vorhandenen Stäube sowie die Anzahl der vorhandenen Staubpartikel. Für die Messungen wurden die beiden Staubmessgeräte „CPC: CPI 3007“ und „Respicon TM“ verwendet. Zum Transport der Messgeräte entlang der festgelegten Messstrecke wurden die Geräte auf der hinteren Ablage eines Autos fixiert (Abbildung 7), so dass die Messköpfe in unmittelbarer Nähe zueinander angeordnet waren. Die kompletten Messungen wurden bei offenen Fenstern durchgeführt. Ein ständiger Luftaustausch war somit gewährleistet.



Abbildung 7: Platzierung der Probenahmeköpfe für die mobile Probenahme

3.2.2. Durchführung der mobilen Staubmessungen

Die Erfassung der Partikelbelastungen in Gießen, Marburg und Wetzlar erfolgte im Rahmen von acht Fahrten, die alle an einem anderen Tag stattfanden und chronologisch von Nr. 1 bis Nr. 8 durchnummeriert wurden.

Tabelle 3: Übersicht der einzelnen Fahrten zur mobilen Staubbmessung

Messtag Nr.	Ort
1	Gießen (mobil)
2	Gießen (mobil)
3	Gießen (mobil)
4	Gießen (stationär)
5	Gießen (stationär)
6	Marburg (mobil)
7	Wetzlar (mobil)
8	Wetzlar (mobil)

Jede mobile Staubbmessung wurde dabei ohne Pause durchgeführt und fand im Zeitraum zwischen 9 Uhr und 13 Uhr statt. Bei jeder mobilen Staubbmessung wurde eine vorher festgelegte Strecke (sogenannte „Messrunde“) fünfmal abgefahren. Die „Messrunden“ wurden abhängig von der Verkehrsbelastung in festgelegten „Messabschnitten“ unterteilt. Diese werden durch jeweils zwei markierte „Wegpunkte“ definiert. Diese „Wegpunkte“ werden in Tabelle 5, Tabelle 6, Tabelle 7 beschrieben.

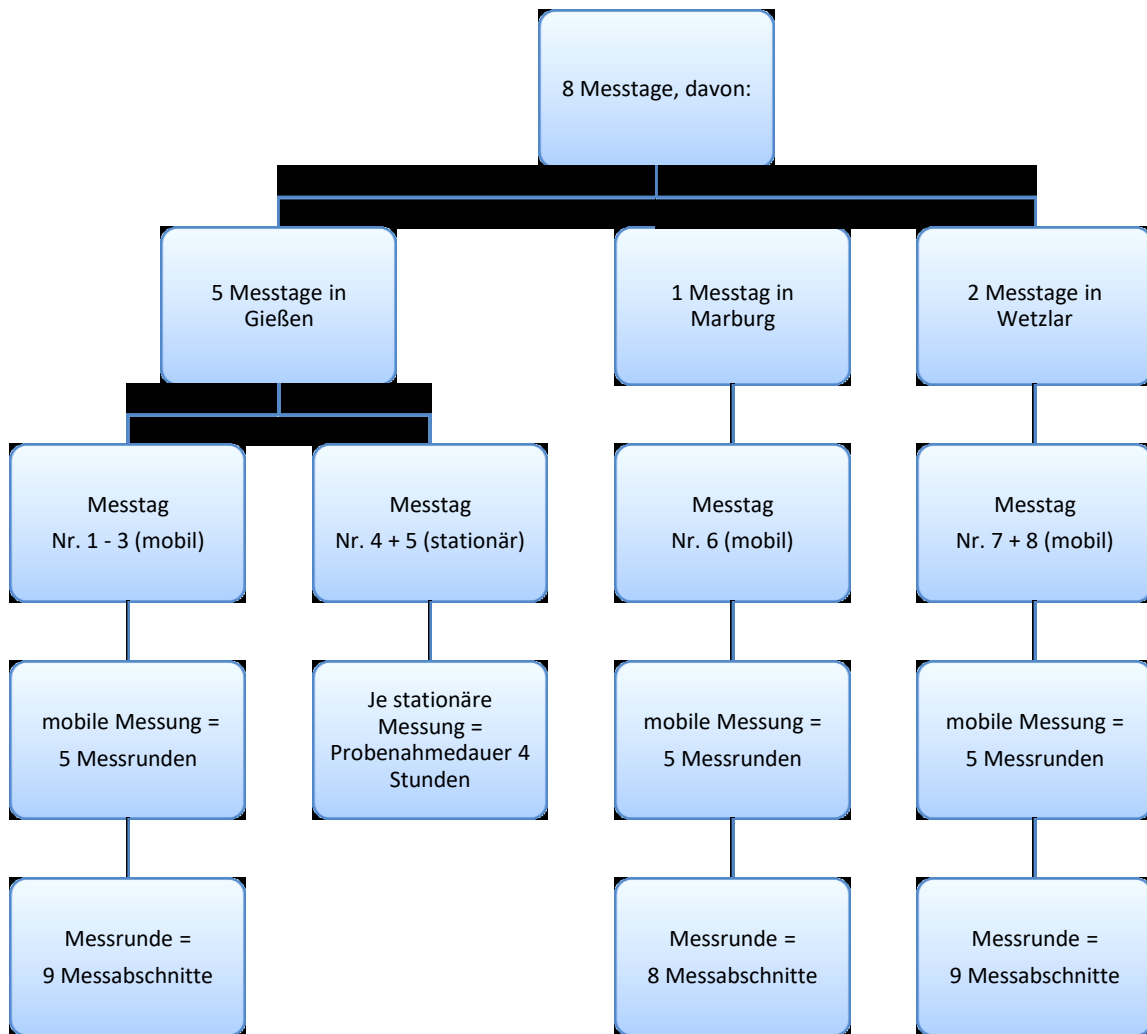


Abbildung 8: Übersicht der einzelnen Messtage in Gießen, Marburg und Wetzlar

Die verschiedenen Messabschnitte sollen verschiedene Belastungen durch Kraftfahrzeugverkehr aufweisen, daher wurden stark befahrene Abschnitte der Innenstadt, wenig belastete Ausfahrtsstraßen sowie Autobahnabschnitte mit hohen Geschwindigkeiten gewählt. Bei den Messtagen in Wetzlar verläuft ein Messabschnitt der Strecke entlang eines Schwerindustriebetriebes.

Die Messabschnitte wurden entsprechend der Verkehrsbelastung durch PKW und LKW bzw. Schwerindustrie, sowie „Stop-and-go-Phasen“ und die unterschiedlichen Geschwindigkeitsbegrenzungen in vier verschiedene Belastungsstufen unterteilt.

1. Als „sehr hoch“ belastet gelten Messabschnitte, welche zusätzlich zu einem sehr hohen Verkehrsaufkommen entweder viele „Stop-and-go-Phasen“ des Verkehrs oder hohe Geschwindigkeit bieten, wie z.B. Streckenbereiche einer Autobahn.
2. Eine „hohe“ Belastung definiert sich entweder durch die Kombination aus sehr viel Kfz-Verkehr, welcher sich mit annähernd gleichbleibender Geschwindigkeiten (ca. 50 km/h) fortbewegt, oder durch ein mittleres Verkehrsaufkommen in der Kombination mit hohen Geschwindigkeiten bzw. vielen „Stop-and-go-Phasen“.
3. Eine „mittlere“ Belastung entspricht mittleren Verkehrsaufkommen mit gleichbleibenden Geschwindigkeiten (ca. 50 km/h) sowie nur einer geringen Anzahl von „Stop-and-go-Phasen“.
4. Als „niedrig“ belastet werden Messabschnitte definiert, welche ein geringes Verkehrsaufkommen mit wenigen ampelbedingten „Stop-and-go-Phasen“ innerhalb des Messabschnittes umfassen oder eine Maximalgeschwindigkeit von 50 km/h vorschreiben.

Tabelle 4: Beispielhafte Einteilung der Gießener Messstrecke in unterschiedliche Belastungsstufen anhand des Verkehrsaufkommens von Kfz in 24 Stunden sowie mittels Ampelanlagen („Stop-and-go“). Die angegebene Anzahl der Kfz gibt das Verkehrsaufkommen der unterschiedlichen Straßen im Bereich eines Messabschnittes zwischen den Wegpunkten wieder (Regierungspräsidium Gießen 2016)

Wegpunkt	Straße	Belastung	Kfz/24h in Tausend	Ampelanlagen auf der Messstrecke
1	Frankfurter Straße/Schubertstraße	hoch	~ 13-24	5
2	Selterstor	sehr hoch	~ 24-25	3
3	Messstelle HLUG / Westanlage	hoch	~ 22-25	2
4	Nordanlage / Ostanlage	mittel	~ 11-22	4
5	Berliner Platz	sehr hoch	~ 11-27	3
6	Grünberger Straße / Licher Straße	hoch	~ 16-27	3
7	Grünberger Straße / Rödgener Straße	niedrig	~ 6-16	3
8	Auffahrt A485 Gießen Ursulum	sehr hoch	~ 45	0
9	Abfahrt A485 Bergwerkswald	Hoch	~ 13-45	2

Zur Synchronisation der Messgeräte sowie zur einfacheren Zuordnung der Ergebnisse zu den jeweiligen Stationen der Messrunde wurde mit einer Digitalkamera ein Bildprotokoll angefertigt. Mit Hilfe des Zeitstempels können die Messdaten einem bestimmten Messabschnitt zugeordnet werden. Zusätzlich können potentiell starke Belastungen auf diese Weise ebenfalls zeitlich exakt den Messwerten zugeordnet werden.

3.2.3. Messtage in Gießen

Die komplette mobile Messstrecke in Gießen umfasst eine Länge von 16,3 km. Sie beinhaltet neun verschiedenen Messabschnitte (vgl. Tabelle 5), welche sich durch Stadt- und Autobahnabschnitte, deutlich unterschiedliches Verkehrsaufkommen und unterschiedlich gefahrene Geschwindigkeiten voneinander unterscheiden und damit verschieden hohe Belastungsintensitäten ausweisen.

Die Datenerhebung beginnt an der Kreuzung „Frankfurter Straße/Schubertstraße“ (Wegpunkt 1) und führt über eine Strecke von 1,3 km zum Selterstor (Wegpunkt 2). Dieser Streckenabschnitt ist durch seine Ampelkreuzungen sowie einen Bahnübergang

vor allem während des Berufsverkehrs durch zahlreiche Stauphasen sowie anhaltenden „Stop- and Go“-Verkehr geprägt und damit als „hoch belastet“ einzuordnen. Die folgende Teilstrecke bis zum Wegpunkt 3, der HLUG Messstelle „Gießen-Westanlage“, ist mit einer Länge von nur 260 Metern die kürzeste innerhalb der definierten Gesamtmessstrecke. Jedoch kommt es hier mit zwei Fahrspuren in jeder Richtung sowie durch zwei Ampelkreuzungen zu einer sehr hohen Verkehrsbelastung. Auf dem nächsten Messabschnitt von Wegpunkt 3 bis zu Wegpunkt 4, der Kreuzung „Nordanlage/Ostanlage“, wird eine Strecke von 1,2 km zurückgelegt. Auch hier handelt es sich um eine zweispurige Verkehrsführung in beide Richtungen. Während es im ersten Teil dieses Messabschnittes noch um eine sehr stark befahrene Strecke handelt, fahren im zweiten Teil deutlich weniger PKW. Daher muss diese Strecke im gesamten nur als „hoch“ belastet eingestuft werden. Der hieran anschließende Streckenabschnitt bis zum „Berliner Platz“ (Wegpunkt 5) zeigt ein vergleichbar starkes Verkehrsaufkommen, jedoch mit weniger Stauphasen und gleichmäßig fließendem Verkehr. Insgesamt wird er damit als „mittel“ belastet definiert.

Der Messbereich vom „Berliner Platz“ bis zur „Grünberger Straße / Licher Straße“ (Wegpunkt 6) ist ca. 500 Meter lang und enthält zwei Ampelkreuzungen. Durch das vorhandene stark erhöhte Verkehrsaufkommen kann dieser ebenfalls als „sehr hoch“ belastet eingeordnet werden. Die folgenden 1,8 km auf der „Grünberger Straße“ von Wegpunkt 6 zu 7 stellen einen durch PKW und LKW weniger stark befahrenen Bereich dar. Diese Teilstrecke fällt daher in die Kategorie „hoch“ belastet. Über 1,6 km führt der nächste Messabschnitt mit vergleichsweise wenig Kfz-Verkehr bis zur Auffahrt „Gießen Ursulum“ auf die A485. Die folgende Teilstrecke zwischen Wegpunkt 8 und 9 umfasst mit 5,9 Kilometern den längsten Bereich der gesamten Messstrecke. Dieser ist in erster Linie durch schnell fahrende PKW sowie viele LKWs auf dem Gießener Autobahnring geprägt. Die letzten 2,9 Kilometer führen von Wegpunkt 9 zum Beginn der Messstrecke zurück an Wegpunkt 1.

Tabelle 5: Übersicht über die Messstrecke in Gießen

Wegpunkt	Straße	Streckenlänge (km)	Belastung
1	Frankfurter Straße/Schubertstraße	1,30	hoch
2	Selterstor	0,26	sehr hoch
3	Messstelle HLUG / Westanlage	1,20	hoch
4	Nordanlage / Ostanlage	0,90	mittel
5	Berliner Platz	0,50	sehr hoch
6	Grünberger Straße / Licher Straße	1,80	hoch
7	Grünberger Straße / Rödgener Straße	1,60	niedrig
8	Auffahrt A485 Gießen Ursulum	5,90	sehr hoch
9	Abfahrt A485 Bergwerkswald	2,90	hoch

3.2.4. Messtag in Marburg

Der Beginn der Messstrecke in Marburg liegt kurz hinter der Abfahrt „neue Kasseler Straße“ der Bundesstraße 3, welche als vom Ausbau einer Autobahn gleichend durch Marburg führt und täglich von über 40.000 Kfz genutzt wird (HMUKLV 2015). Entlang der tagesabhängig unterschiedlich stark befahrenen Bahnhofstraße bis zu der Kreuzung Bahnhofstraße / Elisabethstraße, welche Wegpunkt 2 darstellt wurde eine Strecke von 900 m zurückgelegt.

Teilstrecke 2 bis zu Wegpunkt 3 umfasst bis zum Beginn des Rudolfplatzes ca. 850 m. Dieser Bereich ist im Vergleich zu den anderen Messabschnitten der Strecke weniger befahren und fällt in die Kategorie einer „niedrigen“ Belastung. Über 290 m geht der folgende Messabschnitt bis zu Wegpunkt 4, der HLUG Messstation auf der stark befahrenen und vierspurig ausgebauten Universitätsstraße. Zwischen dieser und der nächsten Messstation der HLUG (Wegpunkt 5) auf der „Gutenberg Straße“ liegen ca. 300 m, welche zum größten Teil in einem Wohngebiet verlaufen.

Auch die folgende Strecke bis zum sechsten Messpunkt auf der Frankfurter Straße beträgt lediglich 600 m und führt ebenfalls durch ein Wohngebiet, somit wird sie als „niedrig“ belastet angesehen.

Die Strecke von Wegpunkt 6 zu 7 entlang der „Gisselsberger Straße“ und damit vorbei an einem Industriegebiet bis hin zur Auffahrt auf die B3 an der „Südspange“ umfasst eine

Strecke von 2,4 km. Hierbei herrscht vergleichsweise wenig Verkehr, jedoch sind für große Teile dieser Strecke Geschwindigkeiten über 70 km/h erlaubt. Sie wird als „hoch“ belastet klassifiziert.

Der letzte Wegpunkt wird nach 2,1 km auf der Bundesstraße 3 erreicht und liegt auf einem Parkplatz der B3 in Höhe eines Sportplatzes an der Sommerbadstraße. Von hier bis zum Startpunkt der Strecke werden auf der Stadtautobahn B3 weitere 2,3 km zurückgelegt. Über die komplette Stadtautobahn ist ein deutlich gesteigertes Verkehrsaufkommen vorhanden und es sind Geschwindigkeitsbegrenzungen von bis zu 100 km/h vorgegeben. Die komplette Strecke umfasst damit über 9,54 km und beinhaltet Messabschnitte der Innenstadt mit geringem und hohem Verkehrsaufkommen, die Bundesstraße 3, welche als Stadtautobahn angesehen werden muss und Ausfallstraßen aus der Innenstadt mit geringerem Verkehrsaufkommen aber höheren erlaubten Geschwindigkeiten.

Tabelle 6: Übersicht über die Messstrecke in Marburg

Wegpunkt	Straße	Streckenlänge (km)	Belastung
1	Neue Kasseler Straße (Abfahrt B3)	0,9	mittel
2	Bahnhofsstraße / Elisabethstraße	0,85	niedrig
3	Rudolphsplatz	0,29	sehr hoch
4	HLUG Station Universitätsstraße	0,3	hoch
5	HLUG Station Gutenbergstraße	0,6	niedrig
6	Frankfurter Straße	2,4	hoch
7	Südspange / B3	2,1	hoch
8	B3 Parkplatz	2,3	sehr hoch

In Marburg fand nur ein Messtag (Nummer 6) statt. Gemessen wurde in der Mittagszeit zwischen 11:02 Uhr und 12:30 Uhr. Es wurden fünf Messrunden absolviert, die alle in einem Zeitrahmen von 16 bis 20 Minuten gefahren werden konnten.

3.2.5. Messtage in Wetzlar

Die Strecke in Wetzlar wurde für die Messtage Nr. 7 und 8 in neun Messabschnitte aufgeteilt. Der erste Wegpunkt wurde an der Kreuzung „Karl-Kellner-Ring“ / „Neustadt“ gesetzt. Bis zu Wegpunkt 2, der HLUG Messstation an der Brücke „Gloelstraße“, werden

1,2 km zurückgelegt. Die dortige Messstation liegt direkt am Buderus Walzwerk und damit unmittelbar an der im Stadtkern von Wetzlar gelegenen Schwerindustrie. Über 800 Meter in einem minder stark befahrenen Gebiet verläuft die Strecke große Teile entlang der Lahn bis zur Kreuzung „Dammstraße“ / „Zeiterstraße“ in Niedergirmes. Die nächsten 1,1 km bis zu Wegpunkt 4 auf der „Naunheimer Straße“ Höhe „Gartenstraße“ verlaufen auch hier durch ein Wohngebiet entlang der Hauptstraße dieses Stadtteiles. Messabschnitt 4 bis 5 gestaltet sich weitgehend einheitlich auf der schwach befahrenen Naunheimer Straße, einer Durchgangsstraße durch den Stadtteil Niedergirmes. Von Wegpunkt 5 bis Wegpunkt 6 führt die Strecke entlang der Hermannsteiner Straße, und damit erneut entlang der bereits zuvor beschriebenen Schwerindustrieanlage. Dieser Messabschnitt umfasst insgesamt 1,15 km. Wegpunkt 6 wurde auf die Kreuzung B277 und „Industriestraße“ festgelegt, somit umfasst Teilstrecke 5 eine Länge von ungefähr einem Kilometer. Der folgende Messabschnitt von Wegpunkt 6 zu 7, welcher in Höhe eines Großmarktes gelegt wurde, ist 1,7 Kilometer lang, liegt gänzlich auf der zweispurig ausgebauten B277 und damit auf einer schnell befahrenen Straße. Wegpunkt 8 in Wetzlar liegt an der Unterführung der B49 durch die „Hohe Straße“ und damit nochmals einen Kilometer weiter. Von Punkt 8 bis Wegpunkt 9, der L3020 in Höhe der Brücke über die Dill bis zum ersten Messpunkt verläuft die Strecke wiederum über eine Länge von 0,3 Kilometern durch Innenstadtverkehr mit mehreren Ampelkreuzungen und damit verbundenen Wartephasen.

Tabelle 7: Übersicht über die Messstrecke in Wetzlar

Wegpunkt	Straße	Streckenlänge (km)	Belastung
1	Karl-Kellner-Ring	1,2	sehr hoch
2	HLUG Messstation Wetzlar	0,8	mittel
3	Dammstraße	1,1	niedrig
4	Naunheimer Straße	2	mittel
5	Hermannsteiner Straße	1,15	hoch
6	B277 / Industriestraße	1,7	hoch
7	B277 / "OBI-Markt"	1	sehr hoch
8	B49 / Hohe Straße	1	hoch
9	Dillbrücke L3020	0,3	sehr hoch

3.2.6. Messtage im Bereich der HLUG Messstellen

Um die eigenen Ergebnisse mit denen der Messstelle des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie (HLUG) zu vergleichen, wurden beide Messgeräte an der Messstelle „Gießen Westanlage“ ungefähr zwei Meter entfernt von der Messeinrichtung der HLUG Messstation positioniert. Es wurde über einen Zeitraum von jeweils vier Stunden gemessen.

3.2.7. Messungen des HLUG

Die vom HLUG durchgeführten Messungen der auftretenden Stäube werden ausschließlich gravimetrisch durchgeführt. Dabei wird als Kenngröße der in der Umweltüberwachung übliche Parameter des PM₁₀ erfasst. Es werden entsprechend alle Teilchen mit einer Abscheidewahrscheinlichkeit von 50% für den aerodynamischen Durchmesser von 10 µm gemessen. Eine weitere Unterteilung dieser Teilchen nach Größe, Anzahl, Zusammensetzung oder gegebenenfalls Anlagerungen erfolgt nicht.

Im Bundesland Hessen, mit einer Fläche von 21.114 km², wird mit Hilfe von 37 Messstationen gemessen, von denen ungefähr 30% im Ballungsgebiet Rhein-Main liegen. Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurden die Daten von vier HLUG Messstationen einbezogen (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Angaben des HLUG zu den Standorten der Messstationen

Station	Lage	Straßentyp	Immisionsbelastung	PKW/Tag	Verkehrsdichte
Gießen	Innenstadt	Durchgangsstraße	hoch	30.000	hoch
Marburg	Innenstadt	Nebenstraße	durchschnittlich	Keine Angabe	mittel
Marburg-Universitätsstraße	Innenstadt	Straßenschlucht	hoch	21.000	hoch
Wetzlar	Innenstadt	große/breite Straße	durchschnittlich	Keine Angabe	mittel

3.3. Statistische Auswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgte mittels Microsoft Excel. Mit Hilfe der jeweiligen Gerätesoftware wurden die Daten der Messgeräte ausgelesen und direkt in Excel integriert. Zur Reduktion der großen Datenmengen von teilweise mehr als 14.000 Messwerten pro Einzelmessung wurden die jeweiligen Messdaten über drei Sekunden gemittelt. Bei stark schwankenden Kurven erfolgte eine Mittelung über 10 Sekunden. Anhand von Zeitstempeln gelang eine Zuteilung der Werte zu den zuvor definieren Messabschnitten.

Im Rahmen der Analyse wurden die Messwerte deskriptiv dargestellt. Dafür wurden die Durchschnittswerte und die Mediane der Partikelanzahl und Partikelmassen ermittelt, um eine Aussage über die Belastung der einzelnen Streckenabschnitte zu treffen. Alle Kalkulationen einschließlich der Ermittlung der Standardabweichungen erfolgten mittels Excel 97. Die Tabellen wurden mittels Excel 97 kalkuliert und die Ergebnisse grafisch dargestellt.

4. Ergebnisse

Die Messungen in Gießen, Marburg und Wetzlar fanden an unterschiedlichen Tagen statt. Um den Einfluss von wetterbedingten Schwankungen zu minimieren wurden auf vergleichbare Witterungsverhältnisse ohne Regen an allen Messtagen geachtet (vgl. Tab. 9). Es wurde darauf geachtet, dass die Witterungsbedingungen jeweils über einen Zeitraum von 24 Stunden vor, sowie auch während der Probenahmen nahezu unverändert waren. Um die spätere Auswertung der mobilen Messgeräte zu erleichtern, wurde an jedem der Wegpunkte ein Digitalbild mit Zeitstempel erstellt.

Tabelle 9: Meteorologische Daten der HLUg Stationen an den einzelnen Messtagen. Die Werte der einzelnen Messorte (Nr. 1-3; 4-5; 6; 7-8) zeigen annähernd identische Witterungsbedingungen

Messtag Nr.	Luftdruck (hPa)	Windgeschwindigkeit (m/s)	Luftfeuchtigkeit %
1	1025	1,22	79
2	1016	1,08	67
3	1012	1,53	74
4	1014	1,82	88
5	1019	1,24	75
6	1020	0,9	99
7	1020	2,4	36
8	1016	2,7	41

Aus Tabelle 9 ist zu entnehmen, dass bei allen Probenahmen ein vergleichbarer Luftdruck herrschte. An den Messtagen 7 und 8 wurde die höchste Windgeschwindigkeit bei gleichzeitig geringster Luftfeuchtigkeit registriert. Die höchste Luftfeuchtigkeit herrschte an Messtag 6 vor. Die Windgeschwindigkeiten an den Messtagen Nr. 1-6 unterschieden sich nicht wesentlich voneinander.

4.1. Messungen in Gießen

4.1.1. Messungen der Partikelanzahl

Bei der Auswertung der Ergebnisse der Gießener Messtage (Nr. 1 – 5) werden zuerst die Daten eines einzelnen Tages dargestellt. Ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Messtage (mobil und stationär) erfolgt am Ende dieses Kapitels.

Die Untersuchung mittels Kondensationskernzähler liefert bei der ersten Probenahme in Gießen für die Teilchenanzahl Ergebnisse von 6.392 bis 360.388 Teilchen/cm³. Dabei sind niedrige Partikelkonzentrationen nur vereinzelt zu verzeichnen und vor allem während der Wartephase vor einer Ampelanlage im Stadtrandgebiet zwischen den Wegpunkten 7 und 8, sowie einer ruhigen Ausfahrtsstraße mit wenig anfahrenden PKW zuzuordnen. Entsprechende Ergebnisse können in zwei der fünf Messrunden beobachtet werden. Bei den übrigen Messrunden liegt die Teilchenzahl an den beschriebenen Wegpunkten im Bereich von 20.000 bis 25.000 Teilchen/cm³. Partikelkonzentrationen von ≥ 300.000 Teilchen/cm³ werden beinahe in jeder Messrunde festgestellt. Diese sind überwiegend dem Messabschnitt des Gießener Autobahnringes mit hohen Geschwindigkeiten zwischen Wegpunkt 8 und 9 zuzuordnen. Außerhalb dieses Messabschnittes werden solch hohe Partikelkonzentrationen lediglich an einer Hauptverkehrsstraße der Innenstadt mit einer Ampelkreuzung, zwei großen Ausfallstraßen und einem dadurch bedingt hohen Verkehrsaufkommen gemessen.

Im Bereich der Innenstadt liegt das größte Aufkommen an Kraftfahrzeugen in Kombination mit häufigen „Stop-an-Go-Phasen“ im Abschnitt 2/3 (Selterstor/Westanlage), hier werden zwischen 17.626 und 204.308 Teilchen/cm³ gemessen, wobei sich beide Extreme in der gleichen Runde finden. Die Ergebnisse zeigen, dass schon einzelne PKW oder LKW die Partikelanzahl deutlich ansteigen lassen.

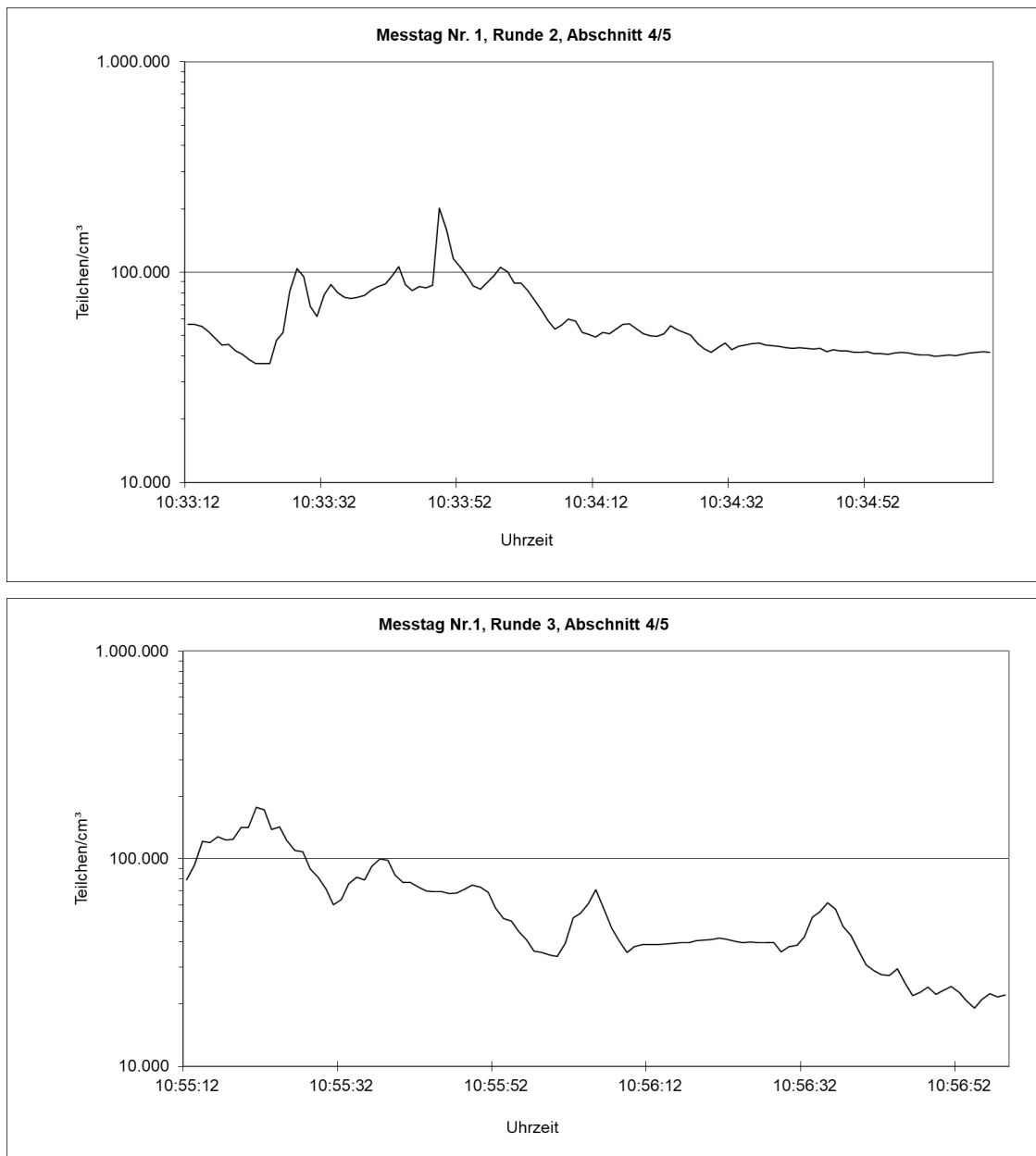


Abbildung 9: Gegenüberstellung der Partikelmessung des Messabschnittes 4/5 in Messrunde 2 und 3. Die einzelnen, teils steilen Peaks zeigen, wie empfindlich einzelne Belastungen durch kurzzeitig auftretende Partikelquellen (Fahrzeuge) registriert werden

Die Gegenüberstellung zweier Messabschnitte, hier Messtag Nr. 1, Messabschnitt 4/5 der Messrunden 2 bzw. 3, zeigt deutlich unterschiedliche Teilchenkonzentrationen. In dieser Darstellung lässt sich anhand der Peaks erkennen, wie empfindlich Belastungen durch einzelne vorbeifahrende Kraftfahrzeuge in diesem verkehrsberuhigten Bereich der Innenstadt sind. Beide Messabschnitte weisen bei weitgehend unterschiedlichem

grafischem Verlauf eine fast identische mittlere Belastung von Messrunde 2 mit 60.634 Teilchen/cm³ bzw. Messrunde 3: 60.125 Teilchen/cm³ auf.

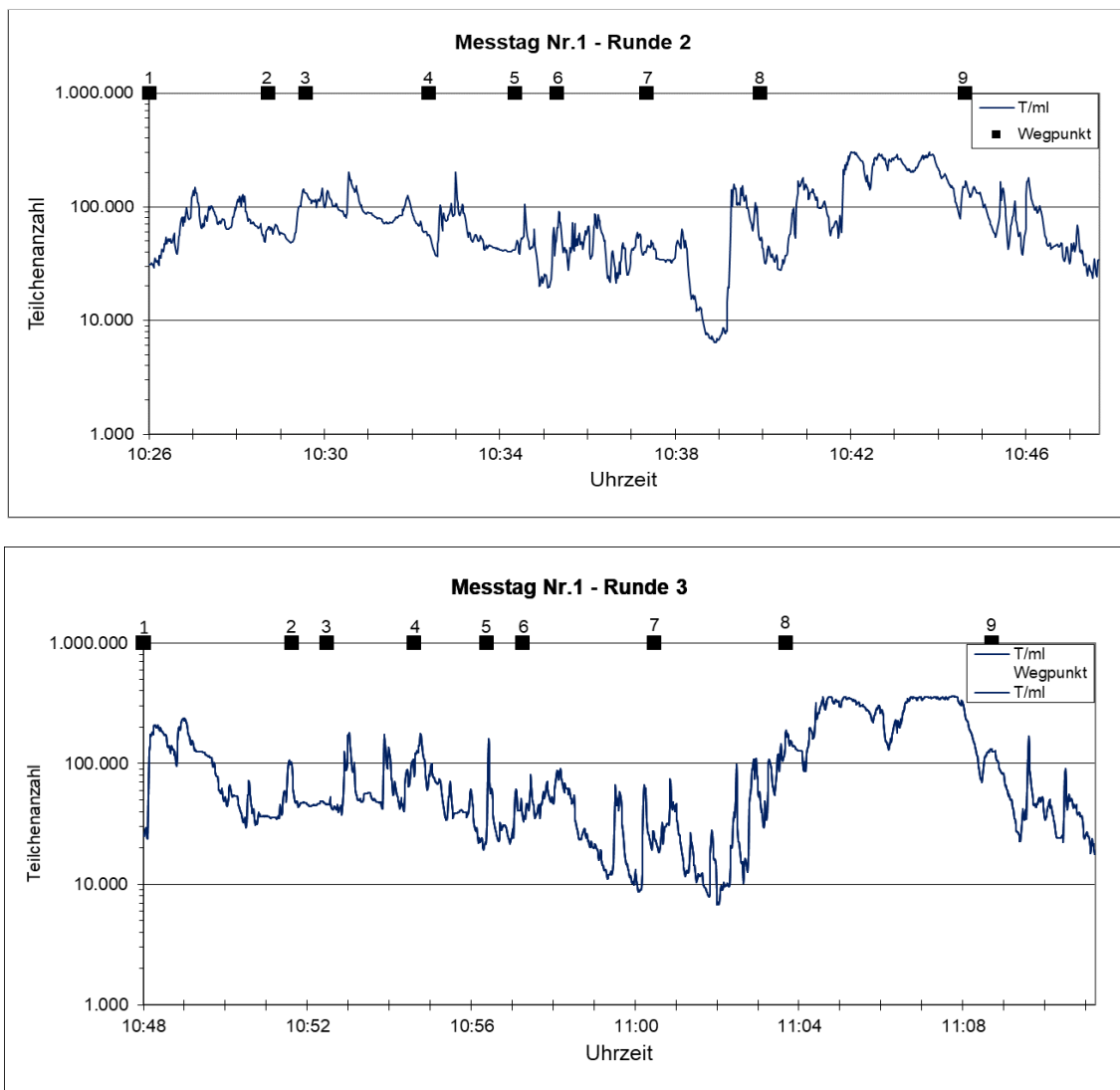


Abbildung 10: Grafische Darstellung der Anzahl registrierter Staubpartikel zweier hintereinander absolvierter Messrunden mit dem Kondensationskernzähler. Die Beschreibung der Wegpunkte erfolgt in Kapitel 3.2.3. Messtage in Gießen

Die grafische Gegenüberstellung der Partikelkonzentrationen zweier hintereinander liegender Messrunden zeigt gewisse Übereinstimmungen: das Minimum zwischen Station 7 und 8 wird auf einer ruhigen Straße im Stadtrandgebiet gemessen. Hohe Teilchenbelastungen finden sich im angrenzenden Messabschnitt auf der Autobahn zwischen Station 8 und 9 mit hohen Geschwindigkeiten. Nach dem Verlassen der

Autobahn (jenseits Station 9) ist in fast allen Messrunden ein Abfall der Teilchenkonzentrationen feststellbar. Damit ist es mittels Partikelkonzentrationsmessung möglich sowohl einzelne Staubquellen als auch kurzzeitige Staubbelastung zu detektieren.

Um die Gesamtbelastung eines Messabschnittes vergleichen zu können werden alle Werte des gleichen Abschnittes aus den vorliegenden Daten extrahiert und das arithmetische Mittel dieser Werte berechnet. Hierdurch kann die Ausprägung der Belastung eines spezifischen Messabschnittes mit anderen Messabschnitten verglichen werden. Hier zeigt Abbildung 11 dass manche Verkehrsbereiche nur geringe Abweichungen in der Partikelkonzentration zwischen den gefahrenen Messrunden aufweisen.

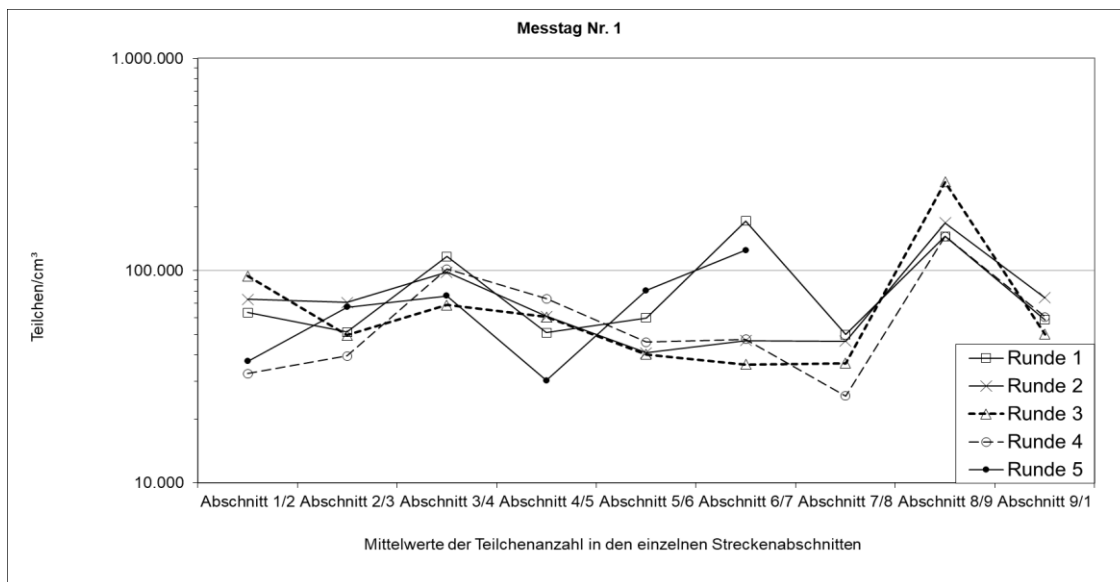


Abbildung 11: Vergleich der Partikelkonzentrationen der 5 Messrunden an Messtag Nr. 1. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.

Geringe Abweichungen der Partikelkonzentration finden sich in Messabschnitten mit einem stabil hohen Verkehrsaufkommen bei konstanten Geschwindigkeiten, wie beispielsweise der Autobahnabschnitt 8/9 oder Messabschnitt 3/4 auf einem ruhigeren Teil des Innenstadtringes. In den Bereichen mit geringerer Kfz-Belastung und verschiedenen Geschwindigkeiten, wie z.B. auf der in die Stadt hineinführenden Frankfurter Straße (Messabschnitt 1/2) oder der vergleichsweise gering frequentierten Grünberger Straße in der Innenstadt (Messabschnitt 6/7) unterscheiden sich die Teilchenkonzentrationen der einzelnen Messrunden deutlicher.

Für den ersten Messtag stellt der Messabschnitt zwischen Wegpunkt 7 und 8 auf einer ruhigen Ausfallstraße am Stadtrand mit einer mittleren Teilchenkonzentration von 39.677 Teilchen/cm³ und einem Median von 30.378 Teilchen/cm³ den Messabschnitt mit der geringsten Partikelanzahl dar. Eine um ca. 20 % höhere Belastung findet sich im Messabschnitt zwischen Wegpunkt 5 und 6. In diesem stark von Kfz befahrenen Hauptverkehrsbereich der Innenstadt können im Mittel 53.516 Teilchen/cm³ bzw. im Median 45.276 Teilchen/cm³ nachgewiesen werden. Neben den höchsten Einzelwerten mit mehr als 360.000 Teilchen/cm werden auf der Autobahn im Messabschnitt 8/9 auch der höchste Mittelwert mit 179.707 Teilchen/cm³ sowie der höchste Median mit 184.130 Teilchen/cm³ festgestellt, wie in den Abbildung 12 und Abbildung 13 für alle fünf Messrunden des Messtages Nr. 1 dargestellt.

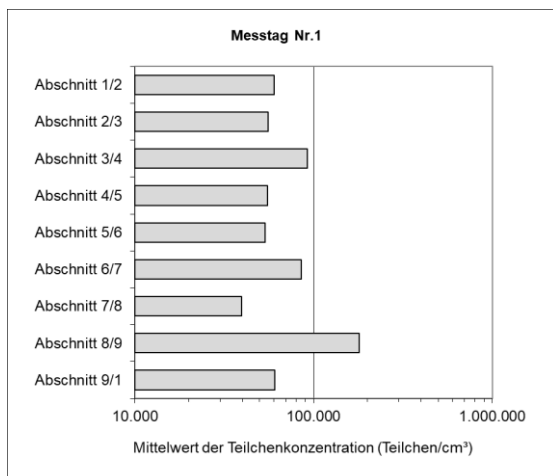


Abbildung 12: Mittelwerte der Teilchenkonzentrationen An Messtag Nr. 1. Die höchste Teilchenbelastung stellt sich im Abschnitt 8/9 und damit auf der Autobahn dar. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.

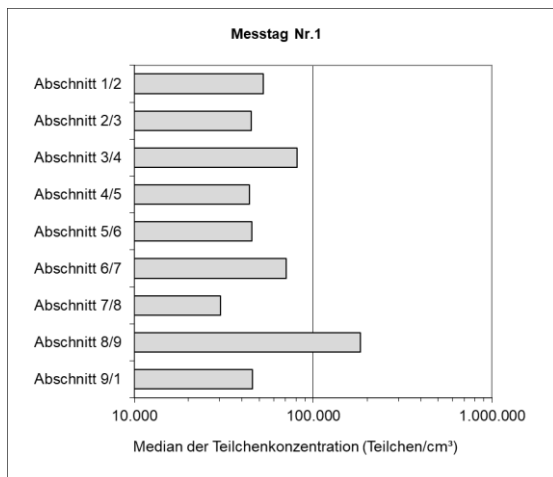


Abbildung 13: Medianwerte der Teilchenkonzentrationen bei an Messtag Nr. 1. Auch im Median liegt der Innenstadtabschnitt 3/4 unterhalb des Autobahnabschnitts 8/9. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.

Im Weiteren erfolgt die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den mobilen und den stationären Messungen. Dabei werden die Messgeräte mit einem ungefähren Abstand von zwei Metern zu den Ansaugstutzen der HLUg Messstelle in Messabschnitt 3/4, und damit einem Hauptverkehrsbereich der Innenstadt platziert. Neben den stationären Messungen (Messtage Nr. 4 und 5) in der Innenstadt von Gießen erfolgen die mobilen Messungen (Messtage Nr. 1 bis 3) in einem vergleichbaren Streckenabschnitt. Um repräsentative Werte zu erhalten, wird jeweils über knapp vier Stunden gemessen. Die Werte der zwei stationären und drei mobilen Probenahmen werden gemeinsam in Tabelle 10 dargestellt, um einen Vergleich der Größenordnungen beider Verfahren zu ermöglichen.

Tabelle 10: Werte der Teilchenanzahlmessungen in Gießen in der Übersicht

Messtag Nr.	Teilchen/cm ³ maximal	Teilchen/cm ³ minimal	Teilchen/cm ³ Ø	Teilchen/cm ³ Median
1 (mobil)	360.388	6.392	82.296	53.687
2 (mobil)	384.259	4.720	78.841	54.015
3 (mobil)	361.269	4.971	61.551	39.699
4 (stationär)	348.844	7.595	50.447	40.660
5 (stationär)	317.995	4.143	40.242	31.497

Hier wird deutlich, dass die Ergebnisse der mobilen und der stationären Messungen trotz gewisser Spannweiten in der Größenordnung übereinstimmen (geringsten Partikelanzahl

4.720 – 7.595 Teilchen/cm³; höchste Partikelanzahl 317.995.000 – 384.259 Teilchen/m³). Die mittlere Anzahl der gemessenen Partikel nimmt dabei von Messtag Nr. 1: 82.296 Teilchen/cm³ bis hin zu Messtag Nr. 5: 40.242 Teilchen/cm³ kontinuierlich ab, die geringste mittlere Partikelzahl unterscheidet sich von der höchsten ungefähr um den Faktor zwei. Beim Median liegt dieser Unterschied zwischen Messtag Nr. 1: 53.687 Teilchen/cm³ und Messtag Nr. 5: 31.497 Teilchen/cm³ ungefähr beim Faktor ~ 1,7. Auch hier ist die absteigende Belastung im Vergleich der Messtage Nr. 1 bis 5 tendenziell erkennbar. Die teils deutlichen Abweichungen, zum Beispiel bei Messtag Nr. 1, zwischen dem Median von 53.687 Teilchen/cm³ und dem Mittelwert von 82.296 zeigen den starken Einfluss einzelner sehr hoher Partikelkonzentrationen auf den Mittelwert dieser Ergebnisse.

Analysiert man die mobilen Messungen bezüglich der einzelnen Messabschnitte, zeigt Tabelle 11 dass die höchsten Durchschnittsbelastungen bei allen drei Probenahmen (Messtage Nr. 1 – 3) im selben Messabschnitt vorliegen.

Tabelle 11: Messabschnitte mit den höchsten bzw. geringsten Partikelbelastungen der Messtage Nr. 1 – 3

Messtag Nr.	Höchste Belastung - Messabschnitt	Teilchenanzahl Ø	Geringste Belastung - Messabschnitt	Teilchenanzahl Ø
1	8/9	179.707	7/8	39.677
2	8/9	158.033	4/5	38.724
3	8/9	144.826	4/5	27.358

Diese werden bei allen mobilen Messtagen auf dem Gießener Autobahnring (Messabschnitt 8/9) aufgezeichnet. Die niedrigsten Mittelwerte zeigen sich bei den mobilen Messtagen Nr. 1 - 3 in den verkehrsmäßig ruhigeren Bereichen der Innenstadt auf Messabschnitten 4/5 (Nordanlage) mit mittlerer Kfz-Belastung bzw. in dem Messabschnitt 7/8 (Grünberger Straße) in Stadtrandlage. Der Unterschied zwischen dem höchsten und niedrigsten Mittelwert der Teilchenanzahl liegt bei allen mobilen Messtagen um etwa den Faktor vier.

4.1.2. Messungen der Massenkonzentration

Für die Massenkonzentrationen werden bei am ersten Messtag zwischen $0,005 \text{ mg/m}^3$ für alle drei Staubfraktionen und maximal $0,0828 \text{ mg/m}^3$ für die A-Fraktion, $0,1321 \text{ mg/m}^3$ für die T-Fraktion und bis $0,5584 \text{ mg/m}^3$ für die E-Fraktion nachgewiesen. Ausgewiesene Staubkonzentrationen von exakt $0,005 \text{ mg/m}^3$ für alle drei Fraktionen sind auf die eingesetzte Messtechnik zurückzuführen, welche die vorhandenen geringeren Belastungen mit der Nachweisgrenze des Respicon von $0,005 \text{ mg/m}^3$ angibt.

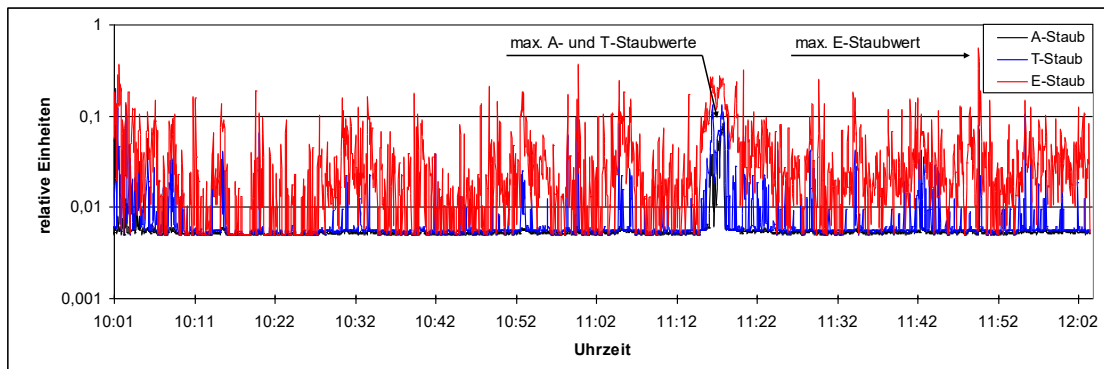


Abbildung 14: Grafische Darstellung der A-, T- und E-Staubkonzentrationen während des Messtages Nr. 1. Die Daten sind hier über 10 Sekunden gemittelt. Deutlich erkennbar ist die Nachweisgrenze von $0,005 \text{ mg/m}^3$, unterhalb derer keine Werte ausgewiesen werden

Abbildung 14 zeigt die grafische Darstellung einer kontinuierlichen Probenahme, in diesem Fall von Messtag Nr. 1 mit fünf Messrunden. Durch die Vielzahl der schwankenden Werte ist selbst nach einer Mittelung über 10 Sekunden keine ausreichende Diskriminierung zu erhalten, und wiederkehrende Muster im Sinne einer Identifikation der einzelnen Runden sind nicht ersichtlich. Erkennbar ist hingegen die untere Nachweisgrenze des eingesetzten Respicons von $0,005 \text{ mg/m}^3$ sowie ein einmaliger deutlicher Anstieg der A- und T-Staubwerte, welche zugleich die maximalen Werte dieser Fraktionen darstellen.

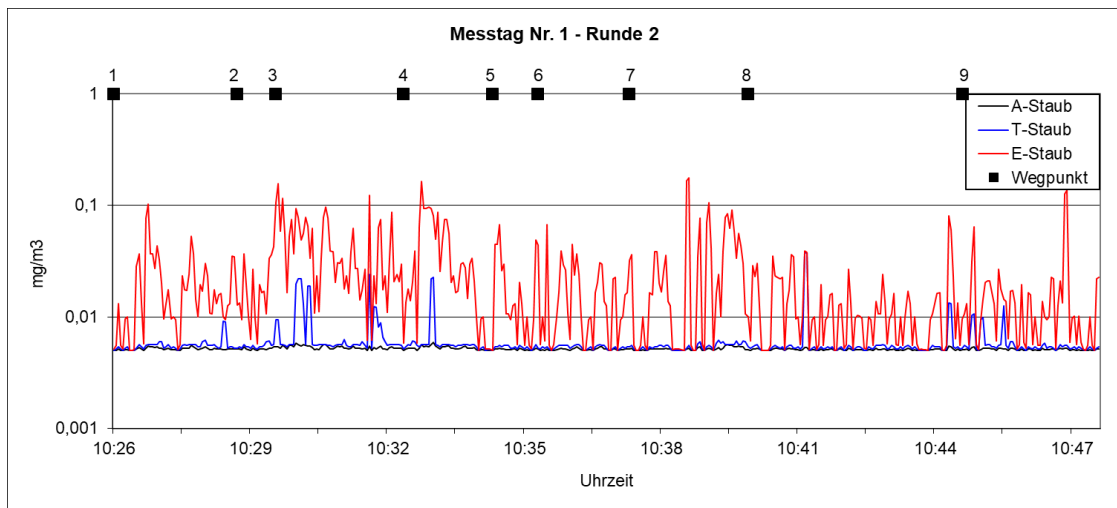


Abbildung 15: Verlauf der A-, T- und E-Konzentrationen einer einzelnen mobilen Messrunde. Die einzelnen Messabschnitte liegen zwischen den oben markierten Wegpunkten 1 bis 9. Deutlich sichtbar sind ausgeprägte Schwankungen im Bereich der größten Partikel (E-Staub), wären diese für die A-Fraktion kaum erkennbar sind. Die Beschreibung der Wegpunkte erfolgt in Kapitel 3.2.3. Messtage in Gießen

Abbildung 15 stellt im Vergleich zur vorherigen Abbildung die Massenbelastungen einer einzelnen mobilen Messrunde am 1. Tag grafisch dar. Für den E-Staub sind die einzelnen Peaks nun deutlich besser zu erkennen. Die hohen Belastungen z.B. zwischen Wegpunkt 3 und 4 in der Innenstadt (Hauptverkehrsstraße) bzw. geringerer Ausprägung der Peaks zwischen Wegpunkt 6 und 7 auf einer schwächer frequentierten Straße der Innenstadt sind erkennbar. Aufgrund der großen Spannweite der Messwerte ist auch bei dieser im Vergleich zu Abbildung 14 höher auflösenden Darstellung eine weitere Diskriminierung hinsichtlich der Teilstrecken nicht möglich. Während der T-Staub mit einzelnen Peaks auf den Messabschnitten 2/3 und 3/4 (Hauptverkehrsstraßen der Innenstadt) bzw. im Messabschnitt 4/5 (Nebenstraßen der Innenstadt), sowie um die Autobahnabfahrt (Wegpunkt 9) noch erkennbare Anstiege liefert, sind für die A-Fraktion trotz logarithmischer Darstellung keine aussagekräftigen Änderungen im Ausmaß der aufgetretenen Masse erkennbar.

Zur besseren Vergleichbarkeit der Partikelmassen werden im Folgenden die errechneten Mittelwerte der neun Messabschnitte des ersten mobilen Messtages in Gießen besprochen. Für die A-Fraktion ergeben sich Mittelwerte zwischen $0,00504 \text{ mg/m}^3$ im

Autobahnabschnitt 7/8 und $0,00596 \text{ mg/m}^3$ in der verkehrsberuhigten Straße im Messabschnitt 1/2. Die Messergebnisse der alveolengängigen Staubfraktion unterscheiden sich trotz stark unterschiedlichen Verkehrsaufkommens kaum. Dies kann daran liegen, dass die Messungen im Bereich der Nachweisgrenze des Messgerätes liegen und über geringere Staubkonzentrationen keine validen Aussagen getroffen werden können. Im Weiteren wird daher auf eine Mittelwertbildung der A-Fraktion verzichtet.

Die Mittelwerte der T- und E-Fractionen werden in Abbildung 16 (T-Fraktion) bzw. Abbildung 17 (E-Fraktion) graphisch dargelegt. Dabei wird der erste Messtag mittels fünf unterschiedlicher Linien dargestellt (vgl. Abbildung 16), welche die fünf einzelnen Messrunden symbolisieren. Jede Messrunde besteht wiederum aus neun einzelnen Messabschnitten, hier durch einzelne Symbole (Quadrate, X, Dreiecke, Kreise, Punkte) voneinander getrennt.

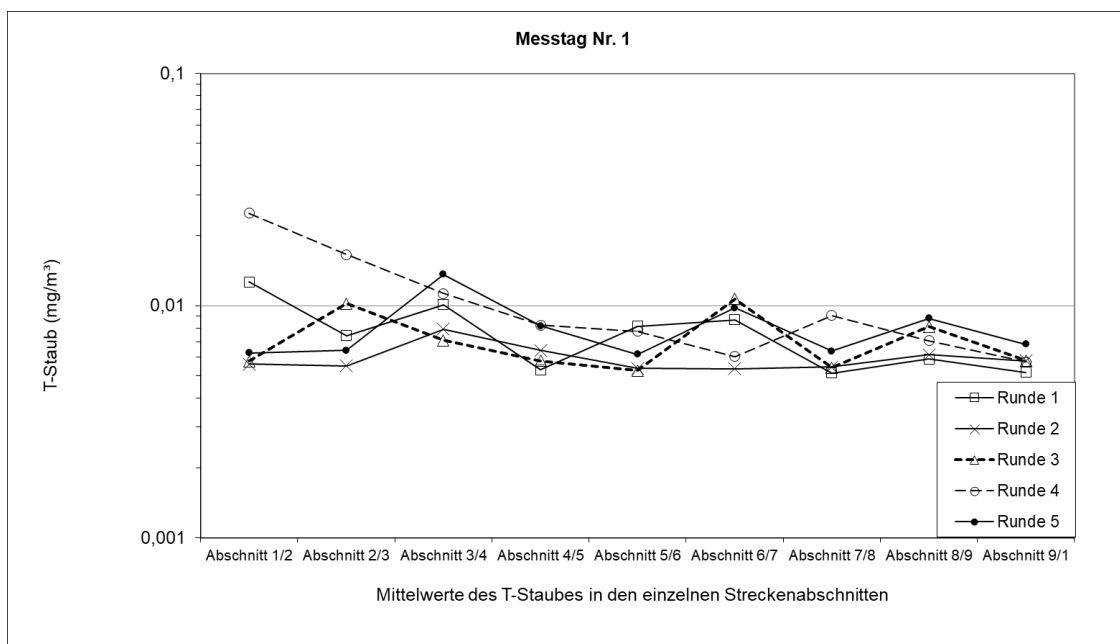


Abbildung 16: Mittelwerte der Messabschnitte der T-Staubfraktion bei der mobilen Probenahme am 1. Tag. Einzelne Messabschnitte zeigen eine vergleichsweise konstante Belastung (9/1), andere deutlich größere Abweichungen (1/2). Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.

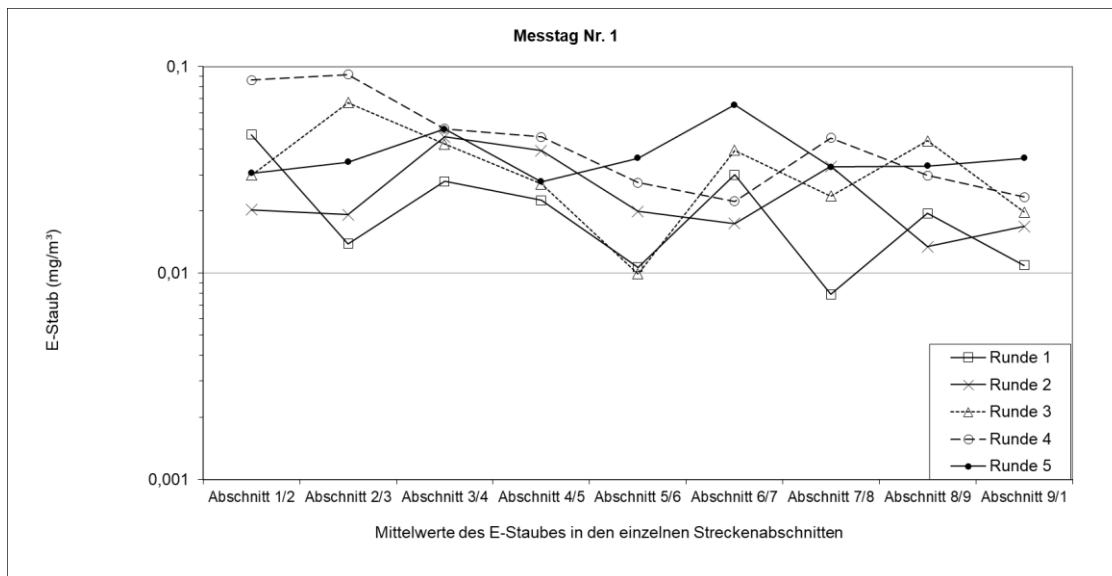


Abbildung 17: Mittelwerte der Messabschnitte der E-Staubfraktion bei der mobilen Probenahme am 1. Tag. Im Vergleich zur T-Fraktion ergeben sich größere Schwankungen in den Massekonzentrationen. Die geringsten Abweichungen zeigen Messabschnitte mit vergleichsweise konstantem Verkehrsaufkommen wie der Innenstadtring 3/4 und der Autobahnabschnitt 8/9. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.

Abbildungen 16 und 17 zeigen die Massenbelastung getrennt nach T- bzw. E-Staubfraktion. Es werden die jeweiligen Abschnitte über die verschiedenen Messrunden synoptisch dargestellt. Abschnitte mit hoher Massenbelastung über mehrere Runden sind der stark belastete Autobahnabschnitt 8/9, sowie der hoch frequentierte Innenstadtbereich 3/4 mit mehreren Ampelanlagen. Beide Messabschnitte sind mit deutlich über 20.000 Kraftfahrzeugen pro Tag befahren. Andere, weniger belastete Abschnitte der Innenstadt wie Messabschnitt 6/7 an der Licher Straße mit knapp unter 20.000 Kfz pro Tag zeigen eine deutlich größere Abweichung der Massenkonzentrationen in den verschiedenen Messrunden. Die Streubreite der Messungen ist in der T-Staubfraktion geringer als in der E-Staubfraktion.

Um die Spannbreite der Belastungen beider Verfahren besser darzustellen, erfolgt ergänzend zur grafischen Darstellung die Gegenüberstellung sowohl der mobilen Messtage Nr. 1 bis 3 als auch der stationären Messtage Nr. 4 und 5 in der Innenstadt von

Gießen in einer Tabelle. Die Maximalwerte dieser fünf Messtage werden in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Maximale Massenbelastung des A-, T- und E-Staubes der fünf Messtage in Gießen

Messtag Nr.	A-Staub mg/m ³ maximal	T-Staub mg/m ³ maximal	E-Staub mg/m ³ maximal
1	0,088	0,201	0,558
2	0,006	0,146	0,370
3	0,424	0,446	0,477
4	0,090	0,764	0,989
5	0,065	0,100	0,289

Für die Bestimmung der Massenkonzentration mittels Respicon ergeben sich zwischen den Messtagen Nr. 1 - 5 Unterschiede um Größenordnungen. So wird der A-Staub am Messtag Nr. 2 mit 0,006 mg/m³, am Messtag Nr. 3 mit 0,424 mg/m³ ermittelt. Vergleichbar liegen die Massenbelastungen des T-Staubes am Messtag Nr. 5 bei 0,100 mg/m³, und am Messtag Nr. 4 bei 0,764 mg/m³ zwar in der gleichen Größenordnung, unterscheiden sich aber immer noch um etwa den Faktor von 7,5. Am geringsten (Faktor ~ 3) fallen die Unterschiede für den E-Staub aus. Am Messtag Nr. 5 werden für diese Fraktion 0,289 mg/m³, am Messtag Nr. 4: 0,989 mg/m³ ermittelt. Die Abweichungen sind damit umso größer, je kleiner die untersuchte Staubfraktion selbst ist (A-Fraktion: Messtag Nr. 2 und 3, Faktor ~ 70; T-Fraktion: Messtag Nr. 4 und 5, Faktor ~7,6; E-Fraktion: Messtag Nr. 4 und 5, Faktor ~3,5). Betrachtet man die Tage der mobilen Messungen (Messtage Nr. 1 - 3), zeigt Tabelle 13 dass die höchsten Durchschnittsbelastungen sowohl für die T- als auch die E-Fraktion nicht im selben Messabschnitt vorliegen. Neben der Innenstadt mit Messabschnitt 3/4 (Hauptverkehrsstraße) ist hier vor allem die Autobahn mit Messabschnitt 8/9 stark durch Partikelmassen belastet.

Tabelle 13: Messabschnitte mit den höchsten Massenbelastung bei den mobilen Probenahmen, getrennt nach den verschiedenen Staubfraktionen. Hinter der Nennung des Messabschnitts, in dem der jeweilige Höchstwert erreicht wird folgt die zugehörige mittlere Massenkonzentration

Messtag Nr.	A-Fraktion Messabschnitt	Ø mg/m ³ maximal	T-Fraktion Messabschnitt	Ø mg/m ³ maximal	E-Fraktion Messabschnitt	Ø mg/m ³ maximal
1	1/2	0,005	3/4	0,007	3/4	0,034
2			8/9	0,006	2/3	0,046
3			8/9	0,189	8/9	0,220

Der höchste im Rahmen der mobilen Messtage in Gießen bestimmte Mittelwert von 0,189 mg/m³ der T-Fraktion am Messtag Nr. 3 übersteigt den zweithöchsten von 0,007 mg/m³ am Messtag Nr. 1 um ein vielfaches. Ähnliches ergibt sich, wenn auch weniger deutlich für den E-Staub mit 0,220 mg/m³ am Messtag Nr. 3 und 0,046 mg/m³ am Messtag Nr. 2. Bemerkenswert ist, dass die höchsten Mittelwerte nicht immer im gleichen Messabschnitt auftreten.

Tabelle 14 stellt die Abweichungen der vollen Messstrecke für die drei ersten Messtage, d.h. jeweils einen Zeitraum von fünf Messrunden mit neun Messabschnitten dar.

Tabelle 14: Mittelwerte der Massenkonzentrationen in mg/m³ aller drei Staubfraktionen über jeweils fünf Messrunden eines mobilen Messtages in Gießen

Messtag Nr.	A-Staub mg/m ³ Ø	T-Staub mg/m ³ Ø	E-Staub mg/m ³ Ø
1	0,006	0,009	0,036
2	0,005	0,006	0,021
3	0,253	0,034	0,085

Tabelle 14 zeigt, dass auch über den gesamten Tag mit fünf Messrunden die Belastung im Mittel bei Messtag Nr. 3 mit 0,034 mg/m³ für den T-Staub bzw. 0,085 mg/m³ für den E-Staub deutlich höher liegt als an den vorherigen Messtagen.

4.1.3. Ergebnisse der stationären Staubmessungen des HLUG in Gießen

Die vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie veröffentlichten Messwerte der Staubbelastung (PM_{10}) stellen jeweils Mittelwerte über 30 Minuten dar. Hiervon unterscheiden sich die von uns gemessenen Werte, die eine Mittelung über 3 Sekunden darstellen. Kurze Schwankungen innerhalb von 30 Minuten lassen sich mit den PM_{10} -Daten damit nicht identifizieren. Beispielhaft soll ein Messprofil eines ganzen Tages dargestellt werden. Die PM_{10} -Werte werden zeitgleich mit der Probenahme an Messtag Nr. 1 erhoben, siehe Abbildung 18.

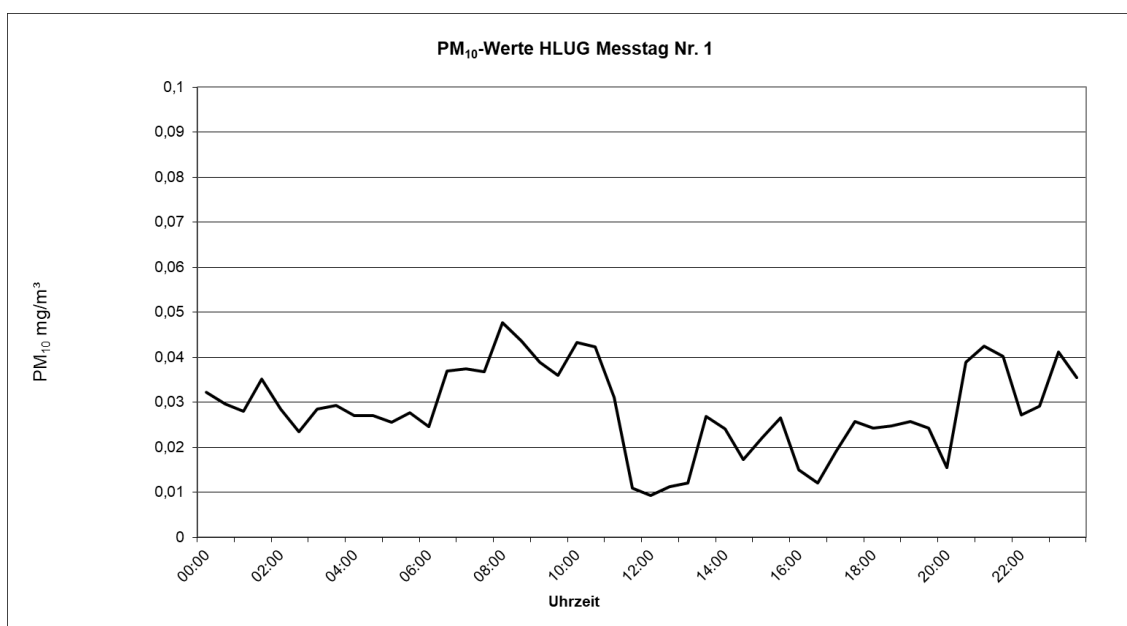


Abbildung 18: Tagesverlauf der HLUG PM_{10} Massenkonzentrationen (Westanlage in Gießen) an Messtag Nr. 1

Von Mitternacht bis zum Beginn des Berufsverkehrs gegen 07:00 Uhr sind Partikel-Belastungen um ca. $0,030 \text{ mg/m}^3$ messbar. Mit dem Berufsverkehr steigt die Belastung bis zum Mittag auf $0,035 - 0,047 \text{ mg/m}^3$ erwartungsgemäß an, um im Verlauf des frühen Nachmittages auf Werte zwischen $0,01$ und $0,025 \text{ mg/m}^3$ abzufallen. Ab ca. 21:00 Uhr werden wieder PM_{10} von $0,030 \text{ mg/m}^3$ gemessen. An diesem Tag liegt das Minimum von $0,0092 \text{ mg/m}^3$ um 12:30 Uhr und das Maximum von $0,0476 \text{ mg/m}^3$ um 08:30 Uhr. Im Zeitraum der eigenen „Messrunde Nr. 1“ liegen die Werte des HLUG zwischen $0,0109 \text{ mg/m}^3$ (12:00 Uhr) und $0,0433 \text{ mg/m}^3$ (10:30 Uhr).

Um eine genauere Analyse der PM₁₀ Belastung im Zeitraum der eigenen stationären Probenahmen zu ermöglichen, werden diese Zeiträume in den Abbildungen 19 und 20 markiert. Dabei zeigt sich trotz vergleichbarer Witterungsbedingungen in diesem Zeitraum ein deutlich unterschiedlicher Verlauf der Massenbelastung.

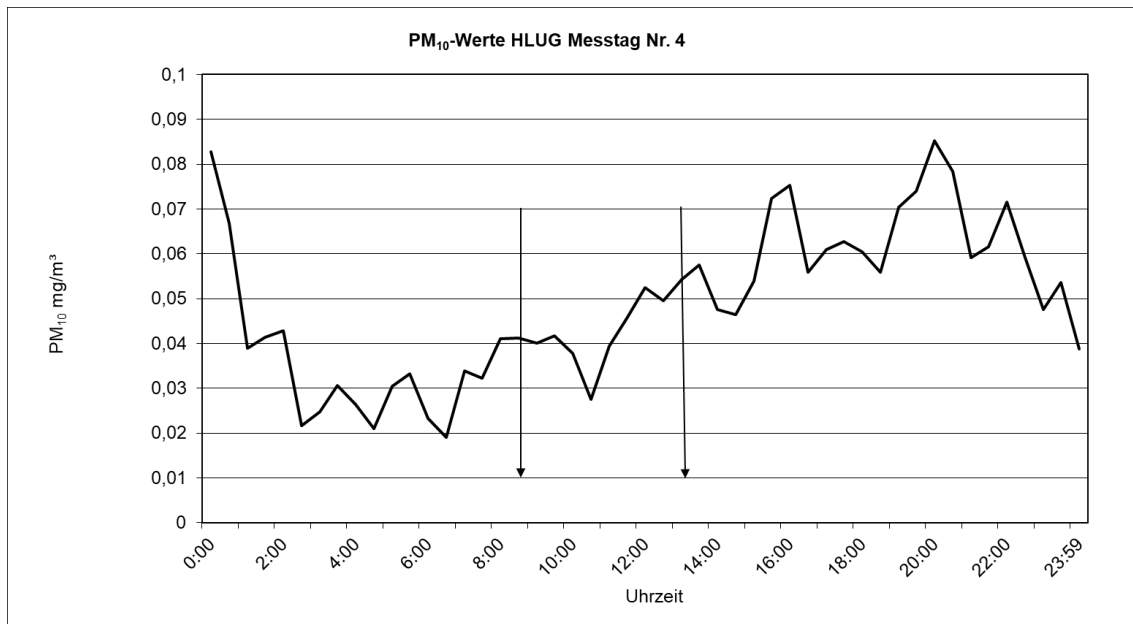


Abbildung 19: Stationärer Messtag Nr. 4. Mit Pfeilen eingegrenzt der V-förmige Verlauf im Zeitraum der Parallelmessungen

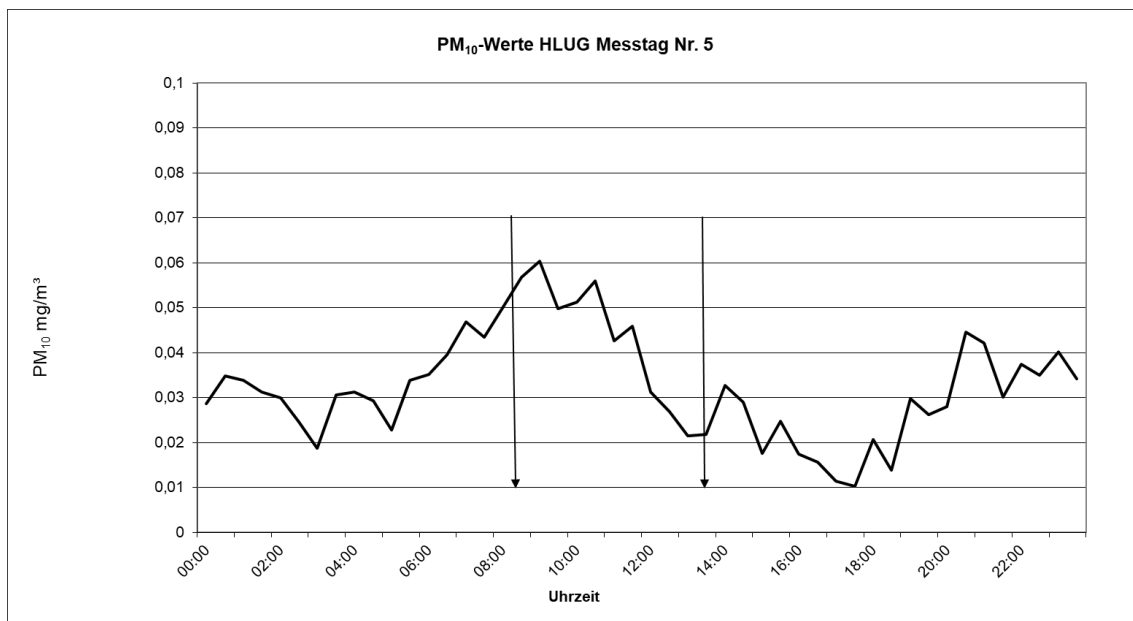


Abbildung 20: HLUG Tagesverlaufskurve an Messtag Nr. 5. Mit Pfeilen eingegrenzt der absteigende Verlauf im Zeitraum der Parallelmessungen

Bei Messtag Nr. 4 (vgl. Abbildung 19) ergibt sich ein V-förmiger Verlauf mit hohen Massenkonzentrationen von 0,04 – 0,055 mg/m³ zu Beginn der Parallelmessung um 8:00 und 13:30 Uhr und einer deutlich niedrigeren Belastung zur vergleichenden Messungen gegen 10:30 Uhr. Für Messtag Nr. 5 (vgl. Abbildung 20) ergeben sich zum Beginn der vergleichenden Messungen um ca. 08:30 Uhr die Tageshöchstwerte mit knapp 0,06 mg/m³. Anschließend folgt einen stufenförmigen Abfall der Belastung bis zum Ende der vergleichenden Messungen gegen 14:00 Uhr auf 0,0218 mg/m³. Beide HLUG-Messungen am identischen Ort zeigen damit verschiedene und teils gegenläufige Verläufe mit unterschiedlicher Ausprägung der Belastung in den beiden Messtagen. Ein reproduzierbarer Verlauf, welcher beispielsweise auch eine wiederkehrende Belastung zu den üblichen Stoßzeiten des Berufsverkehrs aufweist ist hieraus nicht erkennbar.

Die Ergebnisse aller Messtage in Gießen zum Zeitraum der parallelen Probenahmen sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Messwerte des HLUG im Zeitraum der Parallelmessungen

Messtag Nr.	Minimum mg/m ³	Maximum mg/m ³	Ø mg/m ³	Median mg/m ³
1	0,0109	0,0433	0,0327	0,0359
2	0,0284	0,0397	0,0326	0,0316
3	0,0404	0,0602	0,0525	0,0525
4	0,0275	0,0525	0,0418	0,0412
5	0,0215	0,0604	0,0428	0,0459

Tabelle 15 stellt die jeweiligen Werte des HLUG im Zeitraum der fünf Messtage in Gießen (Nr. 1 – 3 mobil, Nr. 4 und 5 stationär an der HLUG-Messstelle) dar. Durch die bereits durch das HLUG durchgeführte Mittelung über 30 Minuten ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede in den minimalen bzw. maximalen Einzelwerten wie dies bei den Ergebnissen des PCP und Respicon der Fall ist. Die Abweichung zwischen Messtag Nr. 2 mit 0,0397 mg/m³ im Maximum und Messtag Nr. 3 mit 0,0602 mg/m³ im Maximum liegt beispielsweise lediglich um den Faktor von 1,5. In Mittelwert und Median bestätigen sich die Abweichungen in dieser Größenordnung. Wie bei den eigenen Bestimmungen

der Massenbelastung sind auch hier die deutlichsten Unterschiede zwischen den Messtagen Nr. 1 bzw. 2 mit jeweils 0,032 mg/m³ im Mittel und Nr. 3 mit 0,0525 mg/m³ im Mittel zu finden.

4.1.4. Zusammenfassende Beurteilung der Staubkonzentrationen in Gießen

Stellt man die gewonnenen Erkenntnisse der Partikelanzahl und -massen gegenüber, so ergeben sich folgende Aussagen:

Die empfindlichste der evaluierten mobilen Messmethoden für einzelne Partikelquellen ist die Partikelanzahl. Hier sind bereits die Partikelemissionen einzelner Kraftfahrzeuge nachweisbar. Die höchsten Belastungen der Partikelanzahl werden überwiegend im Bereich der Autobahn (8/9) registriert, und damit in einem Gebiet vieler Kraftfahrzeuge mit hohen Geschwindigkeiten. Die Partikelmasse erreicht in diesem Bereich ebenfalls hohe Werte, vergleichbar hohe Partikelmassen werden aber auch im Hauptverkehrsbereich der Innenstadt in Messabschnitt 3/4 gemessen. Die Messungen des HLUg können bei diesem Vergleich nicht einbezogen werden, da eine Mittelwertbildung über 30 Minuten die genauere Analyse kurzfristiger Belastungen verhindert.

Betrachtet man die grafische Darstellung der Partikelanzahl, (vgl. Abbildung 10) so zeigt sich eine Übereinstimmung bezüglich der Kurvenverläufe. Dies ist für die Messungen der Partikelmassen mittels Respicon nicht erkennbar (vgl. Abbildung 14). Für die Daten des HLUg ergeben sich teils diametrale Belastungskurven zwischen den einzelnen Messtagen (vgl. Abbildung 19 und Abbildung 20), was eine Bewertung erschwert.

Zu Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen der Partikelanzahl und – masse kommt es im Bereich der Autobahn unter den dort erreichten hohen Geschwindigkeiten. Hier können für alle Bestimmungen der Partikelanzahl und bei wenigstens der Hälfte aller Bestimmungen der Partikelmassen (T- und E-Staub) die maximalen Werte registriert werden.

Beide mobile Messmethoden zeigen, dass sich die Partikelbelastung des „Verkehrsschwerpunktes“ der HLUg Messstelle im Bereich einer durchschnittlichen Belastung über alle Messabschnitte befindet. Andere Messabschnitte, wie zum Beispiel ruhige

Ausfahrtsstraßen oder die schnell befahrene Autobahn zeigen deutlich größere Abweichungen sowohl zu niedrigeren als auch zu höheren Partikelmassen. Die verhältnismäßig starke Verkehrsbelastung durch Kraftfahrzeuge stellt sich damit nicht in einer entsprechend starken Partikelbelastung dar.

Zwischen den einzelnen Messtagen fallen bei allen drei untersuchten Messmethoden deutliche Abweichungen, teilweise in Größenordnungen auf. Diese stellen sich mit ähnlicher Ausprägung sowohl in Mittel- als auch Medianwerten dar und erscheinen damit unabhängig von kurzfristigen Spitzenbelastungen. Für die Partikelanzahl ergibt sich hier eine fast durchgehend absteigende Belastung vom Messtag Nr. 1 bis hin zu Messtag Nr. 5 (vgl. Tabelle 10). Bei den Partikelmassen ergeben sich die größten Unterschiede. Die Mittelwerte übersteigen insbesondere am Messtag Nr. 3 die der ersten beiden Messtage Nr. 1 und Nr. 2 deutlich. Ein vergleichbares Verhalten findet sich für die Massenkonzentrationen im Median (vgl. Tabelle 14). Bei den Ergebnissen des HLUG ergeben sich ebenfalls deutliche Abweichungen zwischen dem Messtag Nr. 3 und den Messtagen Nr. 1 bzw. Nr. 2 (vgl. Tabelle 15). Diese haben eine vergleichbare Ausprägung wie die der Partikelanzahl.

4.2. Messung in Marburg

Messtag Nr. 6 findet in Marburg statt. Dabei werden wie zuvor in Gießen fünf hintereinander folgende Messrunden absolviert, eine Messrunde in Marburg wird in 8 Messabschnitte unterteilt.

4.2.1. Messungen der Partikelanzahl

Die Untersuchung mittels Kondensationskernzähler liefert an Messtag Nr. 6 in Marburg für die Teilchenanzahl Ergebnisse von 8.338 bis 329.971 Teilchen/cm³. Dabei ist die niedrigste Partikelkonzentration auf der wenig, aber mit hohen Geschwindigkeiten befahrenen Einfallstraße „Frankfurter Straße“ in Richtung „Auffahrt Gisselsberg“ (Messabschnitt 6/7) zu verzeichnen. Die höchste Partikelkonzentration von 329.971 Teilchen/cm³ zeigt sich im Messabschnitt 1/2, einem verkehrsberuhigten Bereich der Innenstadt zwischen der Abfahrt des Innenstadtrings und der Bahnhofsstraße. Die mittlere Partikelanzahl der fünf Messrunden liegt bei 55.512 Teilchen/cm³.

Um die Partikelkonzentrationen der einzelnen Messabschnitte in Marburg vergleichen zu können, werden die Messwerte der einzelnen Abschnitte aus den Daten extrahiert und das arithmetische Mittel dieser Werte berechnet. Dieses wird in den Abbildung 21 sowie Abbildung 22 grafisch dargestellt.

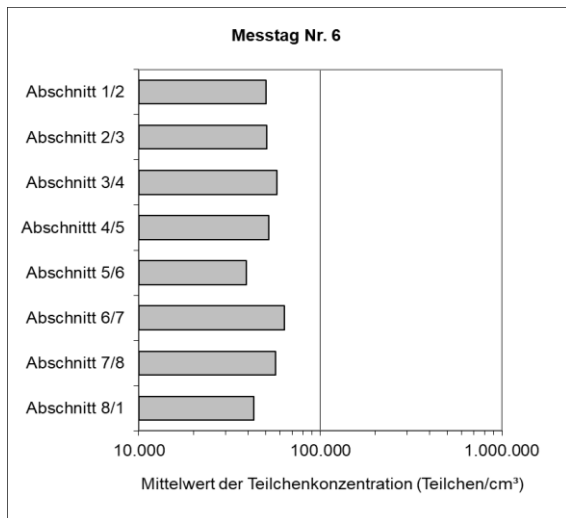


Abbildung 21: Mittelwerte der Teilchenkonzentrationen an Messtag Nr. 6. Die höchste Teilchenbelastung stellt sich im Messabschnitt 6/7, einer Ausfallstraße aus Marburg bei erlaubten Geschwindigkeiten von bis zu 70 km/h dar. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.

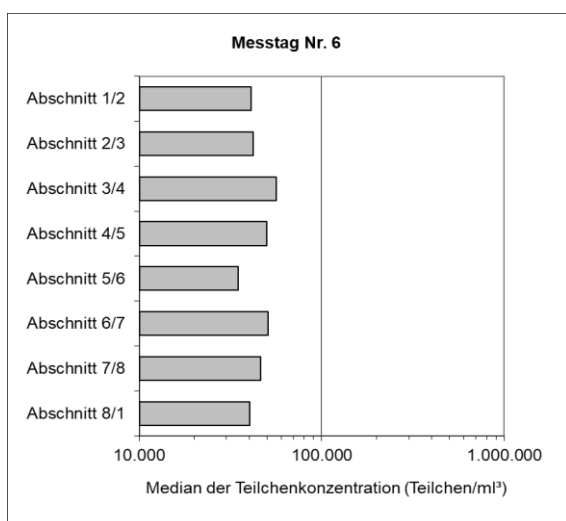


Abbildung 22: Medianwerte der Teilchenkonzentrationen an Messtag Nr. 6. Im Gegensatz zum Mittelwert stellt sich hier die höchste Belastung im Messabschnitt 3/4 in

der Innenstadt (Hauptverkehrsbereich) dar. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.

Die geringste mittlere Belastung aller acht Messabschnitte liegt bei 38.906 Teilchen/cm³ in dem Abschnitt 5/6, einem ruhigen Wohngebiet. Nur knapp darüber liegt mit 42.898 Teilchen/cm³ der Messabschnitt 8/1. Dieser liegt auf der als Autobahn ausgebauten schnell befahrenen „Bundesstraße 3“ und führt zurück zum Beginn der Messstrecke.

Die zweithöchsten Partikelkonzentrationen werden mit durchschnittlich 57.493 Teilchen/cm³ in der sehr stark befahrenen Innenstadt auf Messabschnitt 3/4 zwischen dem Rudolphsplatz und der ersten Probenahmestelle des HLUg auf der Universitätsstraße erreicht. Hierbei handelt es sich um die besonders belastete Region nach HLUg. Die höchste Partikelkonzentration zeigt sich mit einem Mittelwert von 63.185 Teilchen/cm³ in Messabschnitt 6/7, einer mäßig befahrenen Ausfallstraße entlang eines Industriegebietes zwischen der Frankfurter Straße und der Auffahrt „Gisselsberg“ auf die Stadtautobahn. Hier sind Höchstgeschwindigkeiten von 70 km/h erlaubt.

Tabelle 16 zeigt die Durchschnittswerte sowie den Median der Partikelanzahlen in den Messrunden.

Tabelle 16: Mittlere Teilchenanzahl und Median in den einzelnen Messrunden an Messtag Nr. 6 in Marburg

Messrunde Nr.	Teilchenanzahl Ø	Teilchenanzahl Median
1	34.509,24	30.209
2	44.970,01	38.224
3	51.342,29	48.388
4	47.441,68	39.602
5	91.227,52	82.350

Unverkennbar ist hier sowohl im Mittel als auch im Median ein deutlicher Anstieg der Partikelbelastung von der ersten: Mittelwert 34.509 Teilchen/cm³ ; Median 30.209 Teilchen/cm³ bis zur letzten: Mittelwert 91.227 Teilchen/cm³ ; Median 82.350 Teilchen/cm³ der fünf Messrunden zu verzeichnen. Analysiert man die einzelnen

Messrunden, so ist zu erkennen, dass die erste Messrunde für vier der acht Messabschnitte die geringste Partikelkonzentration aufzeigt. Passend dazu werden in der letzten der fünf Messrunden ebenfalls für vier der acht Messabschnitte die höchsten Partikelkonzentrationen registriert.

Mit einer Messzeit von 11:02 Uhr bis 12:30 Uhr findet dieser Messtag weder im Bereich des typischen Berufsverkehrs statt, noch gibt es andere erkennbare Faktoren, welche die deutlich zunehmende Partikelbelastung erklären.

4.2.2. Messungen der Massenkonzentration

Auch in Marburg wird die Massenkonzentration der Staubbelastung mittels Respicon bestimmt. Der Höchstwert der A-Fraktion liegt hier in Messrunde fünf mit $0,02975 \text{ mg/m}^3$ auf der mit hohen Geschwindigkeiten befahrenen Ausfallstraße „Frankfurter Straße“ (Messabschnitt 6/7).

Die T-Fraktion erreicht ihr Maximum ebenfalls in Messrunde fünf mit $0,05520 \text{ mg/m}^3$ in Messabschnitt 1/2, einem verkehrsrhigen Bereich der Innenstadt zwischen Innenstadtring und Bahnhofsstraße. Im gleichen Abschnitt liegt in der dritten Messrunde das Maximum der E-Fraktion mit $0,28827 \text{ mg/m}^3$. Analog zu Gießen, werden die Minima der einzelnen Staubfraktionen durch die untere Messgrenze des Gerätes begrenzt und liegen für alle drei Staubfraktionen bei angegebenen $0,005 \text{ mg/m}^3$.

Zur besseren Vergleichbarkeit der vorhandenen Partikelmassen werden auch für Marburg die Mittelwerte der acht Messabschnitte über die fünf Messrunden analysiert. Auf eine Mittelung der A-Fraktion wird wie zuvor bei den Messtagen Nr. 1 - 5 verzichtet, da auf Grunde der Nähe der Ergebnisse zur Nachweisgrenze des Messgerätes abermals keine validen Aussagen getroffen werden können.

Für die T-Fraktion zeigt, der nur wenig durch Kfz belastete Innenstadtabschnitt 2/3 zwischen Elisabethenstraße und Rudolphsplatz mit $0,0076 \text{ mg/m}^3$ die stärkste mittlere Belastung, gefolgt von Messabschnitt 7/8, dem Übergang auf die Stadtautobahn (Bundesstraße 3) mit $0,00728 \text{ mg/m}^3$. Die geringste Massenbelastung präsentiert sich unerwartet im stark und mit vergleichsweise hohen Geschwindigkeiten befahrenen Autobahnabschnitt 8/1 mit $0,00554 \text{ mg/m}^3$. Betrachtet man die Medianwerte der

Messabschnitte, so fallen die Abweichungen erwartungsgemäß geringer aus (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Mittel- und Medianwerte der Massenkonzentrationen in mg/m^3 von T- und E-Staub während der einzelnen Messabschnitte in Marburg. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.

Messabschnitt Nr.	T-Staub Mittelwert	T-Staub Median	E-Staub Mittelwert	E-Staub Median
1/2	0,0064	0,0054	0,0353	0,0272
2/3	0,0076	0,0055	0,0477	0,0428
3/4	0,0069	0,0054	0,0463	0,0403
4/5	0,0071	0,0055	0,0510	0,0419
5/6	0,0064	0,0053	0,0411	0,0362
6/7	0,0062	0,0055	0,0435	0,0373
7/8	0,0073	0,0055	0,0412	0,0338
8/1	0,0055	0,0053	0,0215	0,0193

Auffällig sind die sehr geringen Abweichungen der Massenkonzentrationen der T-Fraktion. Für die E-Fraktion werden höhere Schwankungen der Massenkonzentration festgestellt. So ergibt sich für die E-Staubfraktion ein hoher Mittelwert von $0,05097 \text{ mg/m}^3$ in der Innenstadt (Messabschnitt 4/5, Hauptverkehrsstraße), gefolgt von $0,04765 \text{ mg/m}^3$ auf der geringer befahrenen Strecke Bahnhofsstraße/Elisabethenstraße (Messabschnitt 2/3). Für die E-Fraktion findet sich der niedrigste Mittelwert im Autobahnabschnitt 8/1 mit $0,02154 \text{ mg/m}^3$. Auch für diesen Messtag erfolgt eine synoptische Darstellung der gemessenen Werte in den Abbildung 23 und Abbildung 24.

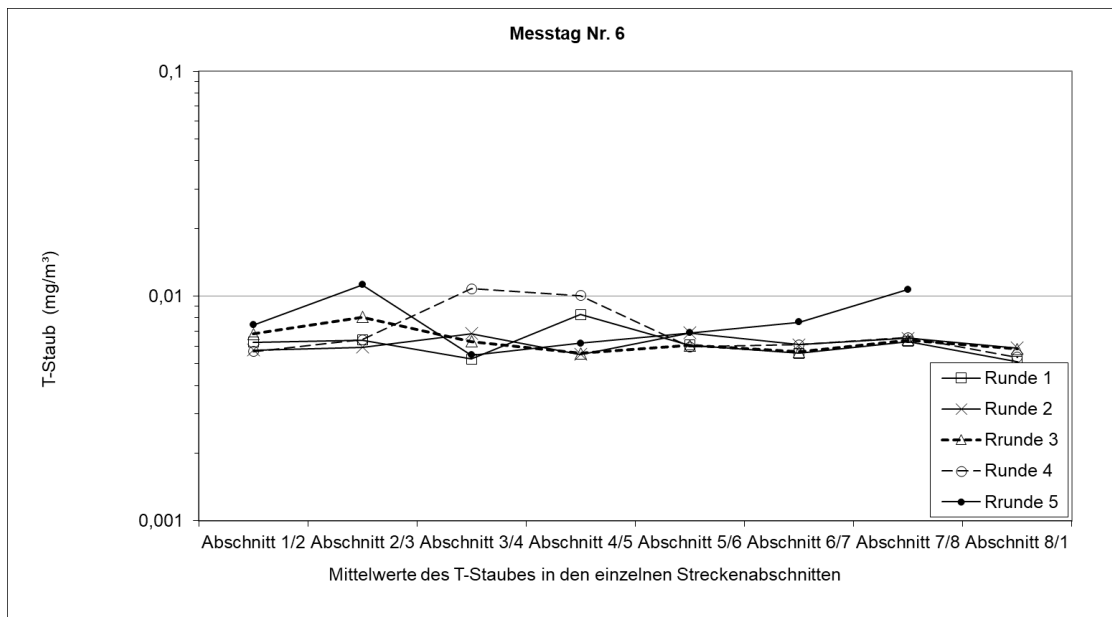


Abbildung 23: Mittelwerte der T-Staubfraktion in mg/m^3 über die einzelnen Messabschnitte und Messrunden. Deutlich zu sehen ist die geringe Streubreite der Massenkonzentrationen der T-Staubfraktion in den einzelnen Messrunden. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.

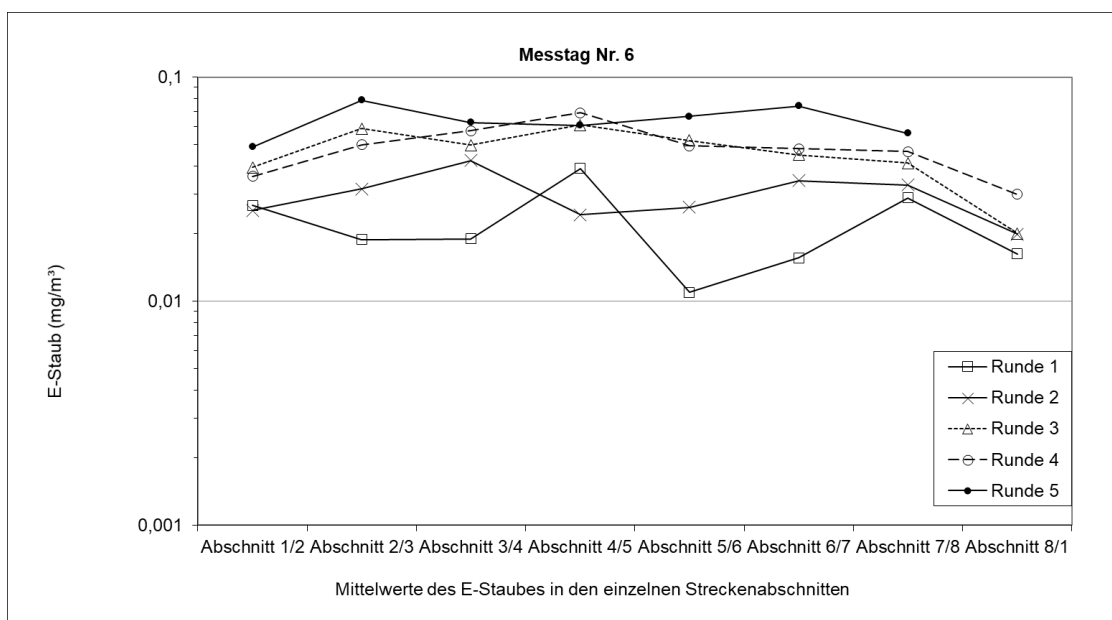


Abbildung 24: Mittelwerte der E-Staubfraktion in mg/m^3 über die einzelnen Messabschnitte und Messrunden. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.

Während Abbildung 23 eine kontinuierliche Zunahme der Massenkonzentration von Messrunde Nr. 1 bis zu Nr. 5 kaum erkennen lässt, ist dies in Abbildung 24 durch die Linienverläufe für die Messabschnitte fast aller Messrunden unübersehbar. So nimmt die E-Staubkonzentration über die Runden Nr. 1 - 5 zu, was daran zu erkennen ist, dass in der letzten Runde bei allen Streckenabschnitten außer Abschnitt 4/5 (Hauptverkehrsstraße Innenstadt) die höchsten Konzentrationen am E-Staub detektiert werden kann. Tabelle 18 stellt dies numerisch dar.

Tabelle 18: Tabellarische Darstellung der Belastung der einzelnen Messrunden in Mittelwert und Median in mg/m^3 für die T- und E-Staub-Fraktion. Deutlich erkennbar in allen Fraktionen ist die zunehmende Massenbelastung von Messrunde Nr. 1 hin zu Messrunde Nr. 5

Messrunde Nr.	T-Staub Mittelwert	T-Staub Median	E-Staub Mittelwert	E-Staub Median
1	0,0059	0,0053	0,0200	0,0143
2	0,0062	0,0053	0,0291	0,0211
3	0,0064	0,0058	0,0454	0,0383
4	0,0071	0,0058	0,0491	0,0444
5	0,0080	0,0058	0,0655	0,0599

In beiden Fraktionen finden sich sowohl im Median als auch Mittelwert ein kontinuierlich und steter Anstieg der Massenbelastung. Somit ist auch mittels dieser mobilen Messmethode eine deutliche Zunahme der Staubb Belastung über die einzelnen Messrunden nachweisbar.

4.2.3. Messungen des HLUG in Marburg

Die beiden Marburger Messstationen des HLUG liefern für den Zeitraum der parallelen Probenahmen Ergebnisse der PM_{10} -Staub-Fraktion zwischen $0,044 \text{ mg}/\text{m}^3$ und $0,051 \text{ mg}/\text{m}^3$ in der Universitätsstraße sowie $0,031 \text{ mg}/\text{m}^3$ und $0,033 \text{ mg}/\text{m}^3$ in der Gutenbergstraße. Das Tagesprofil in der Universitätsstraße zeigt ab Mitternacht eine Absenkung der PM_{10} -Staubfraktion von $0,061 \text{ mg}/\text{m}^3$ auf ein Niveau zwischen minimalen $0,021 \text{ mg}/\text{m}^3$ und $0,030 \text{ mg}/\text{m}^3$ im Zeitraum von 02:30 Uhr bis 07:00 Uhr. Darauf folgend

erscheint ein zackenförmiger Anstieg mit zunehmender Verkehrsbelastung bis zum Tageshöchstwert von $0,082 \text{ mg/m}^3$ gegen 19:00 Uhr. Der Tagesmittelwert liegt bei $0,049 \text{ mg/m}^3$.

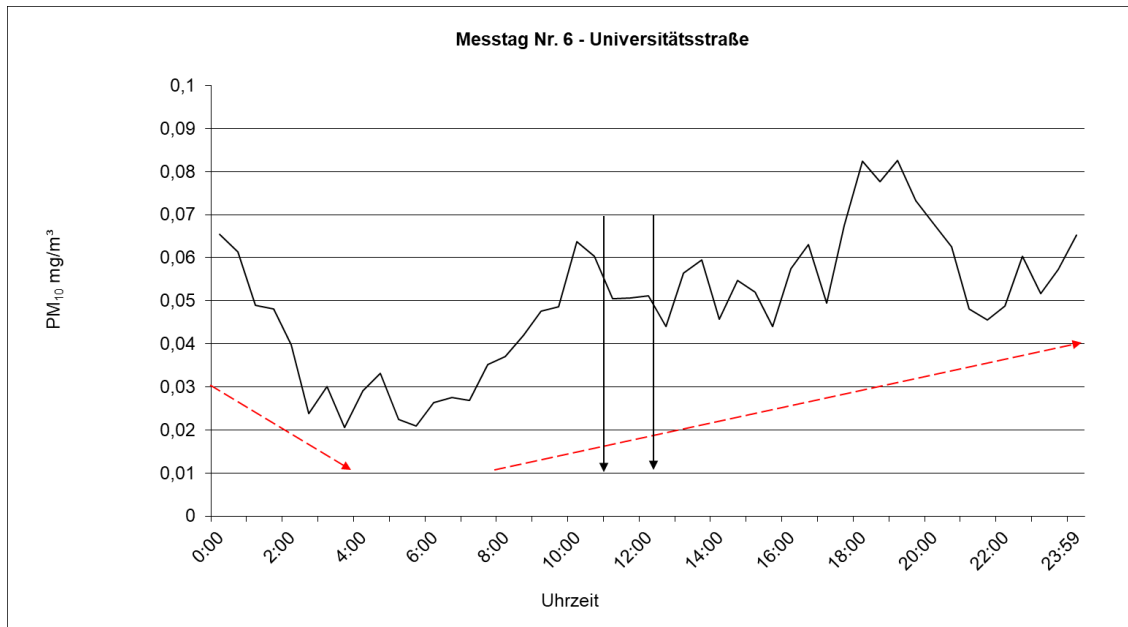


Abbildung 25: HLUG Messwerte der PM_{10} -Staubfraktion in mg/m^3 an der Universitätsstraße. Die schwarzen Pfeile markieren die Zeit der parallelen Messungen. Die rot gestrichelten Pfeile zeigen die Tendenz der Staubbelastung über 24 Stunden

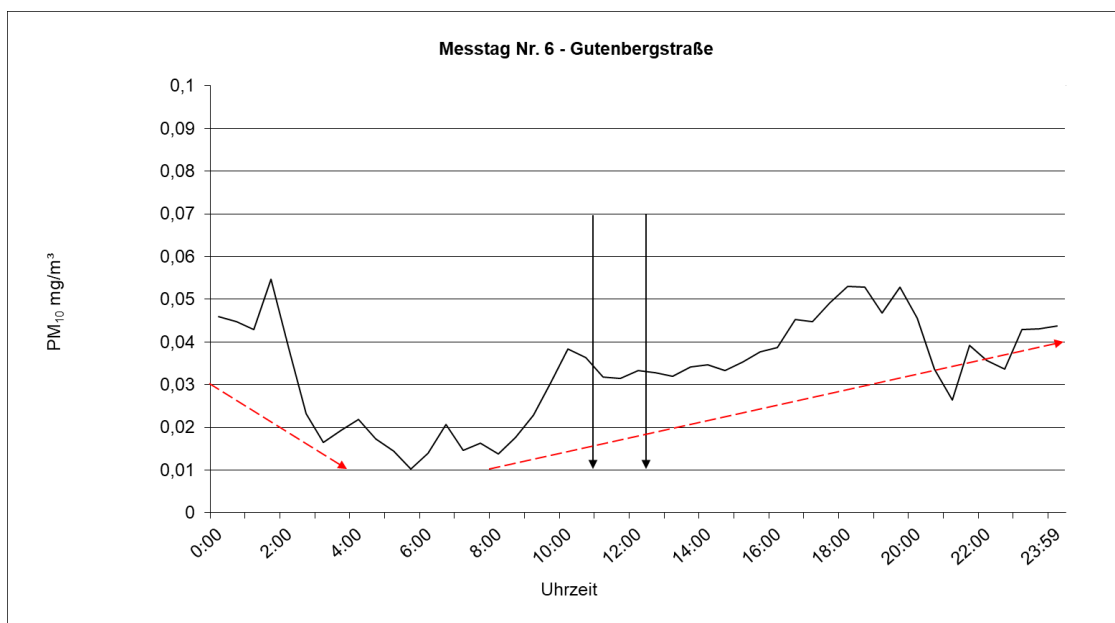


Abbildung 26: HLUG Messwerte der PM_{10} -Staubfraktion in mg/m^3 an der Gutenbergstraße. Die schwarzen Pfeilen markieren die Zeit der parallelen Messungen,

die rot gestrichelten Pfeile zeigen die Tendenz der Staubbelastung in einem Zeitraum von 24 Stunden

Die nur wenige hundert Meter entfernte HLUG Messstelle „Gutenbergstraße“ weist über 24 Stunden verteilt PM_{10} -Staubmassen zwischen minimal $0,010 \text{ mg/m}^3$ gegen 05:30 Uhr und maximal $0,055 \text{ mg/m}^3$ um 01:30 Uhr auf. Das grafische Verlaufsprofil zeigt ähnlich wie die Messstelle „Universitätsstraße“ bei geringer Verkehrsdichte eine Belastung von $\sim 0,050 \text{ mg/m}^3$ um 00:00 Uhr bis unter $0,020 \text{ mg/m}^3$ gegen 02:30 Uhr. Ab ca. 09:00 Uhr steigen die Massen-konzentration mit zunehmender Verkehrsdichte an und erreichen Messwerte zwischen $0,010 \text{ mg/m}^3$ und $0,023 \text{ mg/m}^3$. Auch in den darauffolgenden Stunden steigen die Staubkonzentrationen an und erreichen ihr Maximum mit $0,053 \text{ mg/m}^3$ gegen 18:00 Uhr. Anschließend fallen die Werte wieder ab. Der Vergleich dieser nur ca. 300 Meter voneinander entfernt liegenden Probenahmestationen im Luftmessnetz des HLUG ergibt damit ein im Verlauf ähnliches Tagesprofil mit jedoch deutlich stärkerer Staubbelastung der Messstation „Universitätsstraße“. Tabelle 19 stellt die Minima- und Maxima beider Messstationen dar.

Tabelle 19: Messwerte der HLUG-Stationen für Messtag Nr. 6 in der Übersicht. Alle Werte in mg/m^3

HLUG Messstelle	PM_{10} Maximum	PM_{10} Minimum	Tages- mittelwert
Universitätsstr.	0,083	0,021	0,049
Gutenbergstr.	0,055	0,010	0,033

Tabelle 19 weist die in der Universitätsstraße Marburg deutlich höheren PM_{10} Belastungen im Vergleich mit der Messstelle Gutenbergstraße aus. Die errechnete Tagesdurchschnittsbelastung liegt in der Gutenbergstraße bei $0,033 \text{ mg/m}^3$ und damit fast ein Drittel niedriger als an der Messstelle „Universitätsstraße“. Die Abweichungen der höchsten bzw. geringsten 30-Minuten-Werte des HLUG vom Tagesmittelwert liegen bei beiden Stationen im vergleichbaren Bereich (Faktor $\sim 1,6$).

4.2.4. Zusammenfassende Beurteilung der Staubkonzentrationen in Marburg

Stellt man die gewonnenen Erkenntnisse der Partikelanzahl und -massen gegenüber, so ergeben sich folgende Aussagen:

Eine vergleichsweise geringe Staubbelastung wird in Marburg im Messabschnitt 8/1 und damit auf dem zweiten Teil der mit hohen Geschwindigkeiten befahrenen Stadtautobahn „B 3“ registriert. Bei der Partikelmasse wird hier für beide Staubfraktionen die geringsten, für die Partikelkonzentration die zweitgeringsten Belastungen festgestellt (vgl. Abbildung 21 und Abbildung 22 sowie Tabelle 17). Die stärksten Belastungen finden sich in Marburg für die Partikelkonzentration auf einer schnell befahrenen Ein-/Ausfallstraße entlang eines Industriegebietes (Messabschnitt 6/7) und für die Massenkonzentrationen in verschiedenen stark befahrenen Messabschnitten (2/3, 4/5) in der Innenstadt. Auffällig ist hierbei die starke Belastung des durch Kfz „niedrig“ belasteten Messabschnitts 2/3 zwischen Bahnhofsstraße und Rudolphsplatz.

Die beiden in Marburg vorhandenen Messstationen des HLUg liegen in vergleichsweise geringem Abstand zueinander (~ 300 Meter Luftlinie), weisen dabei aber ein deutlich unterschiedliches Kfz-Aufkommen vor Ort auf. Dies spiegelt sich entsprechend deutlich in der Massenbelastung vor Ort wieder. Mit $0,049 \text{ mg/m}^3$ liegt der Tagesdurchschnitt des „Verkehrsschwerpunktes Universitätsstraße“ deutlich höher, als der der ruhigeren „Gutenbergstraße“ mit $0,033 \text{ mg/m}^3$. Trotz dieser Unterschiede in Verkehrsbelastung und der Größenordnung der mittleren Tagesbelastung ergibt sich für beide Stationen ein vergleichbares Tagesprofil (vgl. Abbildung 25 und Abbildung 26).

Bei beiden mobilen Messverfahren ist über die ca. 90 minütige Probenahme hinweg ein deutlicher Anstieg der Partikel- bzw. Massenbelastung feststellbar. Vergleicht man die Partikelanzahl von Mittelwert und Median der ersten Runde mit der der letzten Messrunde, so ergibt sich ein Anstieg um den Faktor 2,7 (vgl. Tabelle 16).

Für die Massenkonzentrationen findet sich dieser, wenn auch unterschiedlich stark ausgeprägt sowohl in der T- als auch der E-Fraktion wieder. In der T-Fraktion liegt die Abweichung von Runde 1 zu Runde 5 bei Faktor ~ 1,3, für die größere E-Fraktion ergibt sich ein Faktor von ~ 3,2 (vgl. Tabelle 18). Ein vergleichbar starker Anstieg in diesem Zeitraum ist in den Messungen des HLUg nicht nachweisbar, bei nur vier ausgegebenen

Messwerten in diesem Zeitraum sind die Daten des HLUG für diesen Messtag allerdings auch nur sehr eingeschränkt vergleichbar.

Ein Grund für diesen Anstieg in der Staubbelastung über alle Verfahren hinweg dürfte in den klimatischen Bedingungen vor Ort liegen. Die an Messtag Nr. 6 nur geringe Windgeschwindigkeit von weniger als 1 m/s im Mittel (vgl. Tabelle 9) liegt unterhalb der vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz für Marburg angegebene kritische Windgeschwindigkeit von mindestens 1,5 m/s (HMUKLV 2015). Eine entsprechend hohe Windgeschwindigkeit ist jedoch für einen effektiven Austausch der Luftmassen inklusive der vor Ort entstandenen Partikel in den Marburger Talniederungen notwendig. Meist findet dieser in der Nacht durch bodennah zuströmende kältere Luft aus Ost oder West statt. Passend zu den geringen Windgeschwindigkeiten an Messtag Nr. 6 präsentiert sich ein kumulierter Anstieg der PM₁₀-Belastung bei fehlendem Abtransport der lokal entstandenen Staubbelastung über den Tag hinweg, sowie der deutliche Abfall der PM₁₀-Belastung mit zunehmenden Winden ab Mitternacht in den Abbildung 25 und Abbildung 26.

4.3. Messung in Wetzlar

Die Messtage Nr. 7 und Nr. 8 finden in Wetzlar statt. Wie in Gießen werden an jedem Messtag fünf Messrunden mit jeweils neun Messabschnitten absolviert. An Messtag Nr. 7 stehen für die Partikelkonzentration auf Grund eines technischen Defekts nur Daten aus dreieinhalb Messrunden zur Verfügung. Dadurch wird die Aussagekraft der Daten deutlich eingeschränkt.

4.3.1. Messungen der Partikelanzahl

Für die beiden Messtage Nr. 7 und 8 in Wetzlar liegen die Partikelkonzentrationen nahe beieinander, siehe Tabelle 20.

Tabelle 20: Partikelkonzentrationen in Teilchen/cm³ der Messtage Nr. 7 und 8 in Wetzlar

Messtag Nr.	Teilchen/cm ³ maximal	Teilchen/cm ³ minimal	Teilchen/cm ³ Ø	Teilchen/cm ³ Median
7	300.230	5.615	27.437	17.761
8	322.974	5.515	37.527	24.908

Hier werden mit minimal 5.515 Teilchen/cm³ die geringsten aller Partikelkonzentrationen dieser Untersuchungen gemessen. Dies gilt auch für die durchschnittliche Teilchenanzahl mit 27.437 Teilchen/cm³ und im Median mit 17.761 Teilchen/cm³.

Um die Partikelkonzentrationen der einzelnen Messabschnitte in Wetzlar vergleichen zu können, werden die Messwerte der einzelnen Abschnitte aus den Daten extrahiert und das arithmetische Mittel dieser Werte berechnet. Dieses wird für die Messtage Nr. 7 und 8 in den Abbildung 27 und Abbildung 28 grafisch dargestellt.

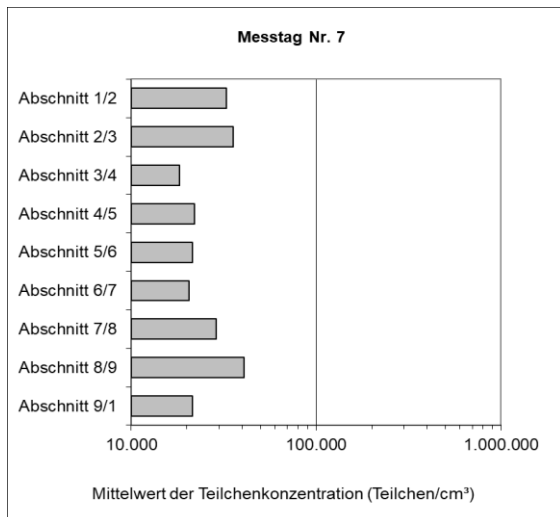


Abbildung 27: Mittelwerte der Teilchenkonzentrationen in Teilchen/cm³ an Messtag Nr. 7. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.5.

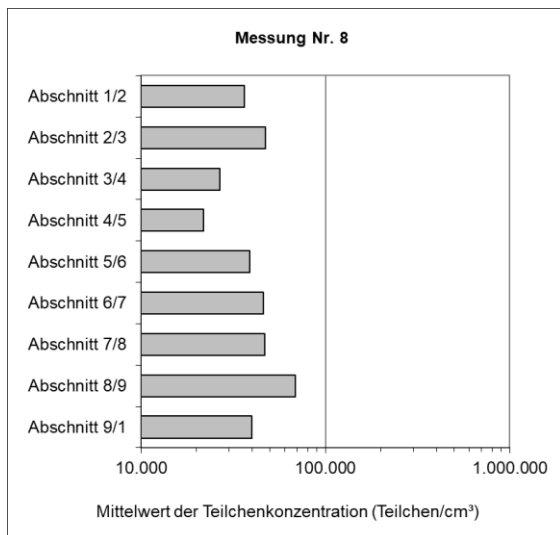


Abbildung 28: Mittelwerte der Teilchenkonzentrationen in Teilchen/cm³ an Messtag Nr. 8. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.5.

Die Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen eine erkennbare Übereinstimmung bezüglich der auftretenden Belastungen an beiden Messtagen. Während sich nach einer mittleren Partikelbelastung in den Messabschnitten 1/2 (Karl-Kellner Straße, Hauptverkehrsstraße Innenstadt) und 2/3 (HLUG Messstelle, Wohngebiet mit Industriebetrieb in der Nähe) eine geringere Partikelkonzentration über die nächsten drei Messstationen (Dammstraße, Naunheimer Straße sowie Hermannsteiner Straße) in einem Wohngebiet bzw. an einer Ausfallstraße zeigt, steigt an beiden Messtagen die Belastung in Messabschnitt 8/9 (Innenstadt Hauptverkehrsstraße) auf ein Höchstmaß an. Eine genaue Übersicht über die gemessenen Werte bietet Tabelle 21.

Tabelle 21: Darstellung der Messabschnitte mit der geringsten und höchsten Partikelbelastung in Teilchen/cm³. Angegeben wird der Mittelwert und Median

Messtag Nr.	Höchste Belastung Messabschnitt	Teilchenanzahl Ø	Geringste Belastung Messabschnitt	Teilchenanzahl Ø
7	8/9	40.876	3/4	18.170
8	8/9	68.637	4/5	21.831

Die geringste mittlere Partikelkonzentration befindet sich in Wetzlar an Messtag Nr. 7 in der nur schwach befahrenen Dammstraße (Messabschnitt 3/4) in einem Wohngebiet entlang der Lahn: Die Partikelkonzentration beträgt 18.170 Partikeln/cm³ bei einem Median von 12.619 Partikeln/cm³. An Messtag Nr. 8 stellt Messabschnitt 4/5 im als

Wohngebiet geprägten Stadtteil Niedergirmes mit 21.831 Partikeln/cm³ im Mittel und einem Median von 19.726 Teilchen/cm³ die geringste Belastung. Die höchste Partikelkonzentration liegt an beiden Messtagen in Messabschnitt 8/9, einem nur etwa 300 Meter langen Bereich der Innenstadt in Richtung L3020 mit sehr hohem Verkehrsaufkommen sowie mehreren Ampelkreuzungen.

Mit 40.876 Teilchen/cm³ an Messtag Nr. 7 und 68.637 Teilchen/cm³ an Messtag Nr. 8 zeigt sich in dieser Tabelle zwar eine Übereinstimmung bezüglich des Messabschnittes mit der stärksten Belastung, die eigentliche Partikelanzahl bietet aber wie bei vorherigen Messtagen (vgl. Abschnitt 4.1.1.) eine deutliche Abweichung um den Faktor ~ 1,6.

Von besonderem Interesse stellt sich an den Messtagen Nr. 7 und 8 der auf einer Ein- bzw. Ausfallstraße gelegene Messabschnitt 5/6 dar, da dieser entlang eines Schwerindustriebetriebes (Stahlwalzwerk) liegt. Mit einem Mittelwert von 21.471 Teilchen/cm³ bzw. einem Median von 17.329 Teilchen/cm³ an Messtag Nr. 7 und einem Mittelwert von 38.845 Teilchen/cm³ bzw. einem Median von 26.998 Teilchen/cm³ an Messtag Nr. 8 ergeben sich hier jedoch vergleichsweise eher niedrige Partikelkonzentrationen. Eine überdurchschnittliche Belastung durch den Industriebetrieb kann bei gleichzeitig niedriger Kfz-Belastung nicht nachgewiesen werden.

4.3.2. Messungen der Massenkonzentration

Für die Massenkonzentrationen werden an den Messtagen Nr. 7 und 8 zwischen 0,005 mg/m³ für alle drei Staubfraktionen und maximal 0,353 mg/m³ für die A-Fraktion, 0,438 mg/m³ für die T-Fraktion und bis 0,461 mg/m³ für die E-Fraktion gemessen. Ausgewiesene Staubkonzentrationen von genau 0,005 mg/m³ für alle drei Fraktionen sind wie an den vorherigen Messtagen auf die eingesetzte Messtechnik zurückzuführen, welche die auftretenden geringeren Belastungen mit der Nachweisgrenze von 0,005 mg/m³ angibt. Die Höchstwerte der Massenkonzentrationsmessungen Nr. 7 und 8 werden zur besseren Übersicht tabellarisch visualisiert.

Tabelle 22: Übersicht der Massenkonzentrationen in mg/m³ an den Messtagen Nr. 7 und 8

Messtag Nr.	A-Staub mg/m ³ maximal	T-Staub mg/m ³ Maximal	E-Staub mg/m ³ maximal
7	0,353	0,438	0,461
8	0,016	0,271	0,438

Während am Messtag Nr. 7 mit 0,353 mg/m³ für die A-Fraktion eine Belastung nachgewiesen werden konnte ist diese am letzten Messtag (Nr. 8) nicht mehr verifizierbar. Die Staubkonzentration an der T- und E-Fraktion liegen mit 0,438 mg/m³ bzw. 0,461 mg/m³ im Bereich der aus den vorhergehenden Messtagen bekannten Ergebnisse dieser Partikelgrößen. Beachtenswert ist, dass alle drei Staubfraktionen an diesem Messtag zum gleichen Zeitpunkt ihre Maximalwerte aufweisen. Diese stellen sich mit weiteren vergleichsweise hohen Partikelmassen in einem kurzzeitigen Peak von ca. 10 Sekunden in Messrunde vier auf der Ausfallstraße (Messabschnitt 5/6) in Herrmannstein dar. Eine erkennbare Ursache dieser kurzzeitigen Spitzenbelastung ist retrospektiv nicht darstellbar. Die Maximalwerte am letzten Messtag (Nr. 8) liegen mit 0,016 mg/m³ für die A-Fraktion, 0,0271 mg/m³ für die T-Fraktion sowie 0,438 mg/m³ für die E-Fraktion in den bekannten Größenordnungen der jeweiligen Fraktionen.

Zur besseren Vergleichbarkeit der vorhandenen Partikelmassen werden auch für Wetzlar die Mittelwerte der neun Messabschnitte über die fünf Messrunden analysiert. Auf eine Mittelung der A-Fraktion wird wie zuvor bei den Messtagen Nr. 1 - 6 verzichtet, da auch hier trotz einzelner zuvor erwähnter Höchstwerte auf Grund der überwiegenden Nähe zur Nachweisgrenze des Messgerätes keine validen Aussagen getroffen werden können. Für die Massenbelastungen der beiden Messtage in Wetzlar ergibt sich ein zweigeteiltes Bild. Zwar werden innerhalb eines Messtages die höchsten Massenkonzentrationen beider Staubfraktionen in den gleichen Abschnitten erfasst, der Messabschnitt, in dem diese auftreten unterscheidet sich aber zwischen beiden Messtagen, wie in Tabelle 23 ersichtlich.

Tabelle 23: Messabschnitte mit der stärksten Massenbelastung an Messtag Nr. 7 und 8.

Alle Werte in mg/m^3

Messtag Nr.	T- Staub maximal	Messabschnitt Nr.	E-Staub maximal	Messabschnitt Nr.
7	0,065	8/9	0,116	8/9
8	0,010	5/6	0,032	5/6

Die Daten des Messtages Nr. 7 verdeutlichen, dass sich für beide Staubfraktionen der stark befahrene Innenstadtabschnitt 8/9 auf der „B49 - Hohe Straße“ als derjenige mit der höchsten Massenkonzentration ergibt. Die Ergebnisse sind dabei insbesondere für die T-Fraktion um ein vielfaches höher als die des folgenden Messtages Nr. 8. Bei dieser stellt sich für beide Fraktionen der Messabschnitt 5/6 zwischen Hermannsteiner Straße und der Auffahrt auf die B 277, die Ausfallstraße entlang des Stahlwalzwerks, als Messabschnitt mit der höchsten Massenbelastung an diesem Tag dar. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Messtagen zeigen sich auch, berechnet man die mittlere Belastung des jeweils gesamten Tages.

Tabelle 24: Mittelwert und Median der Staubfraktionen der Messtage Nr. 7 und 8 über fünf Messrunden. Alle Werte in mg/m^3

Messtag Nr.	T-Staub Ø	T-Staub Median	E-Staub Ø	E-Staub Median
7	0,062	0,056	0,091	0,082
8	0,012	0,005	0,026	0,005

Tabelle 24 verdeutlicht die Abweichungen über Größenordnungen zwischen den beiden Messtagen in Wetzlar. Diese unterschieden sich im T-Staub bis zum Faktor ~ 5 , bei der E-Fraktion um den Faktor $\sim 3,5$.

4.3.3. Messungen des HLUG in Wetzlar

Die Messstation des HLUG liefert für die Messtage in Wetzlar Ergebnisse der PM_{10} -Fraktion zwischen $0,009 \text{ mg}/\text{m}^3$ und $0,107 \text{ mg}/\text{m}^3$ an Messtag Nr. 7 bzw. $0,017 \text{ mg}/\text{m}^3$ und $0,032 \text{ mg}/\text{m}^3$ für Messtag Nr. 8.

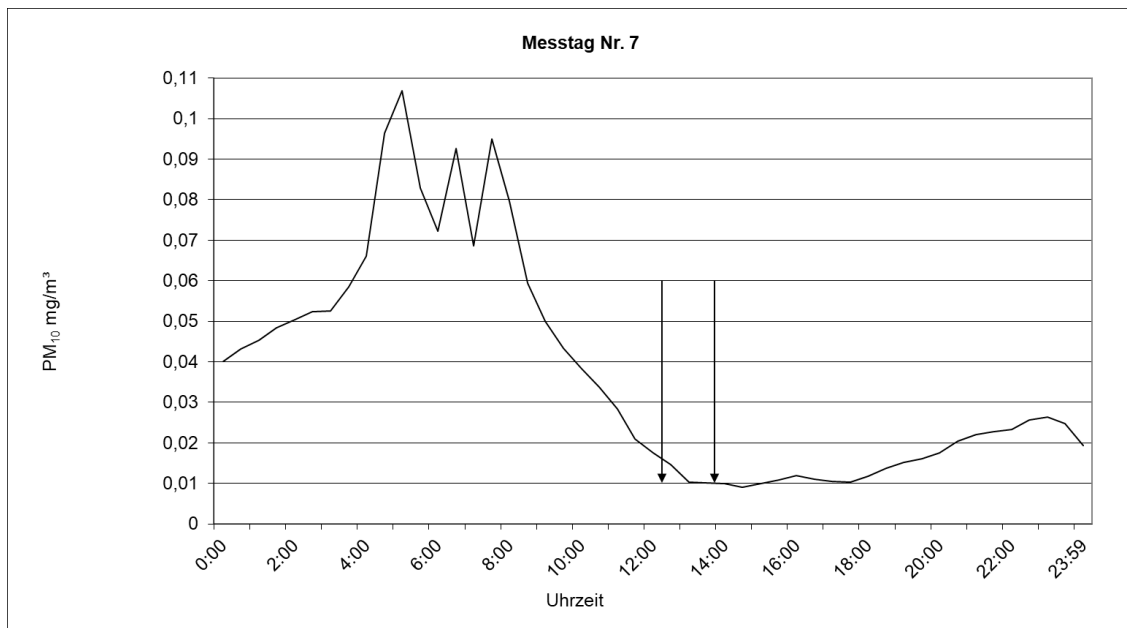


Abbildung 29: PM₁₀ Messwerte in mg/m³ der HLUG Station in der Gloelstraße an Messtag Nr. 7. Auffällig sind die drei Konzentrationsspitzen im Verlauf der ersten Tageshälfte

Das Tagesprofil der Messstation an der Hermannsteiner Straße zeigt für Messtag Nr. 7 ab Mitternacht einen Anstieg der Belastung von 0,040 mg/m³ auf 0,066 mg/m³ um 04:00 Uhr. Daraufgehend steigen die Werte weiter deutlich bis 08:00 Uhr und zeigen in der grafischen Darstellung einen zackenförmigen Verlauf mit Spitzenbelastungen von mehr als 0,09 mg/m³ um 05:00 Uhr, 6:30 Uhr und 07:30 Uhr. Die Schwankungsbreite liegt in diesem Zeitraum zwischen 0,059 mg/m³ und 0,107 mg/m³. Von 08:00 bis 14:30 Uhr fällt die PM₁₀-Belastung auf den Tagestiefstwert von 0,009 mg/m³ ab, um im weiteren Verlauf des Abends wieder langsam bis auf 0,026 mg/m³ anzusteigen.

An Messtag Nr. 8 ergeben sich für die Messstation Hermannsteiner Straße insbesondere in der ersten Tageshälfte Massenbelastungen, die sich deutlich von denen der vorherigen Messtage unterscheiden.

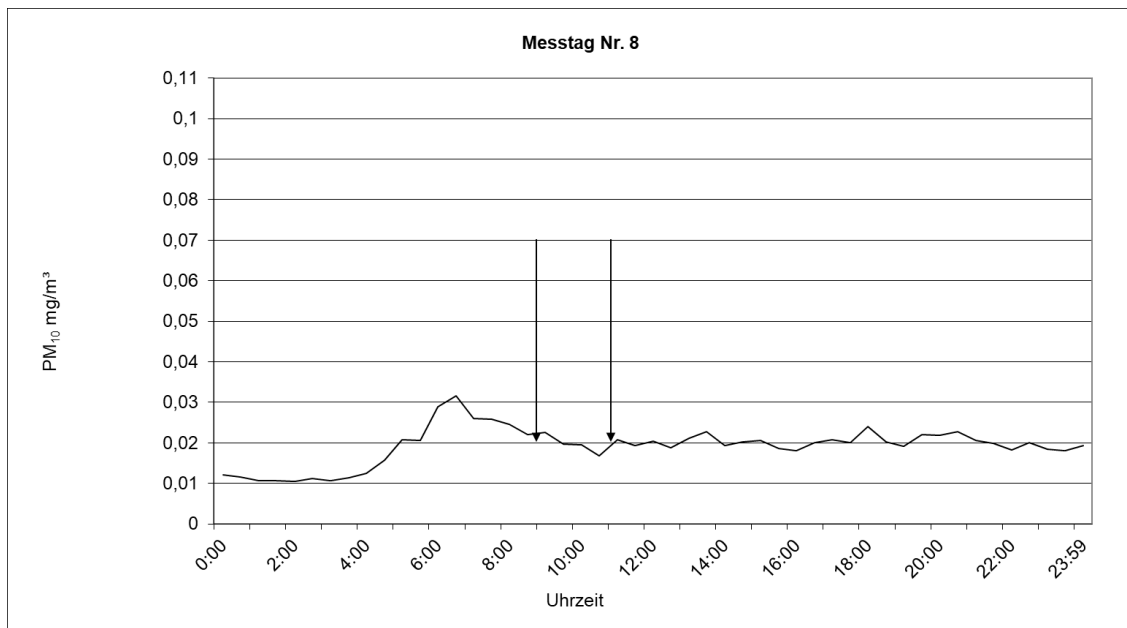


Abbildung 30: PM₁₀ Messwerte in mg/m³ der HLUG Station in der Gloelstraße an Messtag Nr. 8. Erkennbar ist hier die im Vergleich zum vorherigen Messtag deutlich reduzierte Belastung im Bereich der ersten Tageshälfte

Von 00:00 Uhr bis 04:00 Uhr liegt die Belastung an PM₁₀ zwischen 0,011 mg/m³ und 0,012 mg/m³. Danach steigt sie bis ca. 06:30 Uhr auf den Tageshöchstwert von 0,032 mg/m³ an, bevor sie über die folgenden zwei Stunden auf 0,022 mg/m³ abfällt. Für den Rest des Tages pendeln die Werte in einem relativ engen Bereich zwischen minimal 0,017 mg/m³ und maximal 0,024 mg/m³. Weitere Werte der beiden Messtage werden in Tabelle 25 dargestellt.

Tabelle 25: Übersicht der HLUG Messungen in Wetzlar an den Messtagen Nr. 7 und 8

Messtag Nr.	Niedrigster Messwert (mg/m ³)	Höchster Messwert (mg/m ³)	Mittelwert (mg/m ³)
7	0,009	0,107	0,0375
8	0,011	0,032	0,0192

In der Übersicht zeigt Tabelle 25 einen erkennbaren Unterschied zwischen den Ergebnissen der Messtage in Wetzlar. An Messtag Nr. 7 übersteigt die höchste gemessene Partikelmasse mit 0,107 mg/m³ in der Spitze und einem Tagesmittelwert von 0,0375 mg/m³ die Massenkonzentrationen des Messtages Nr. 8 mit maximalen 0,032 mg/m³ bzw. 0,0192 mg/m³ im Mittel um ein vielfaches. Die hohen Mittelwerte sind dabei vor allem

auf die starken Belastungen in der ersten Tageshälfte des Messtages Nr. 7 zurück zu führen (vgl. Abbildung 29).

Die Ursache dieser Belastung war im Rahmen der durchgeführten parallelen Messungen nicht feststellbar. Entsprechend der Einstufung des HLUG ist dieser Standort nur durch ein „mittleres“ Verkehrsaufkommen belastet, eine Kfz-bedingte Massenkonzentration dieser Größenordnung insbesondere in den frühen Morgenstunden erscheint damit unwahrscheinlich. Glaubhafter ist der Ursprung der Belastung in den industriellen Emissionen des nur ca. 600 Meter entfernten Stahlwalzwerkes zu suchen. Diese sind, nach Angaben des HMUELV (2011) für die überwiegende Zahl der in Wetzlar auftretenden Überschreitungen der PM₁₀-Grenzwerte verantwortlich, könnten also auch hier Grundlage der Spitzenbelastungen sein.

4.3.4. Zusammenfassende Beurteilung der Staubkonzentrationen in Wetzlar

Stellt man die gewonnenen Erkenntnisse der Partikelanzahl und -massen gegenüber, so ergeben sich folgende Aussagen:

Für die Partikelanzahl übersteigen die Ergebnisse des Messtages Nr. 8 die des vorherigen Messtages Tag Nr. 7 ungefähr um den Faktor $\sim 1,6$. Die Höchstwerte werden dabei an beiden Messtagen überwiegend im gleichen Messabschnitt ermittelt, einem stark befahrenen Bereich der Innenstadt mit vielen Kfz und Ampelkreuzungen zuzuordnen.

Die Ein- bzw. Ausfallstraße des Messabschnittes 5/6 entlang des Stahlwalzwerkes zeigt eine vergleichsweise geringe Belastung und erreicht an beiden Messtagen jeweils nur ca. 50 % der maximal erreichten Partikelanzahlen.

Für die Massenkonzentration können an Messtag Nr. 7 Höchstwerte von 0,065 mg/m³ im T-Staub bzw. 0,116 mg/m³ im E-Staub im gleichen Bereich (8/9) festgestellt werden. Messtag Nr. 8 liefert deutlich geringere Massenbelastungen von 0,01 mg/m³ im T-Staub bzw. 0,032 mg/m³ im E-Staub, zudem treten die größten Massen diesmal in Abschnitt 5/6 (Ein-/Ausfallstraße) entlang der innerstädtischen Industrieanlage auf (vgl. Tabelle 23).

Die Messungen des HLUG zeigen an den beiden Messtagen in Wetzlar deutlich unterschiedliche Belastungen. Die grafische Darstellung (vgl. Abbildung 29 und

Abbildung 30) zeigt, dass diese vor allem in den frühen Morgenstunden zustande kommen. Hier ergeben sich zwischen beiden Messtagen Abweichungen um mehr als den Faktor 3. Da diese Belastungen außerhalb der Zeit der eigenen Probenahmen auftraten, können über die Quelle der Staubmassen zu diesem Zeitpunkt nur Vermutungen angestellt werden. Eine Ursache im Bereich der Industrieanlagen erscheint auf Grund der Uhrzeit sowie des Ausmaßes am wahrscheinlichsten.

Bemerkenswert sind bei allen drei Methoden die deutlich unterschiedlichen Belastungen im Vergleich der beiden Messtage. Für beide Massenkonzentrationsmessungen (HLUG sowie Respicon) zeigt sich Messtag Nr. 7 um ein Mehrfaches höher belastet. Bei der Partikelanzahl ist dies anders. Hier weist Messtag Nr. 8 eine höhere Belastung der vorhergehende Messtag nach.

4.4. Vergleich der Staubbelastungen in Gießen, Marburg und Wetzlar

Im Weiteren erfolgt die Gegenüberstellung der Ergebnisse aller mobilen Messtage in Gießen, Marburg und Wetzlar. Für einen angemessen objektiven Vergleich wurden die Messabschnitte hier nach Lage der Strecke in der Stadt (z.B. Innenstadt, Stadtrand oder Autobahn) kategorisiert. Im Fall mehrerer Messtage wie in Gießen und Wetzlar wurden die Ergebnisse der Messrunden gemittelt.

Tabelle 26: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilchenanzahl in Teilchen/m³ sowie des T- und E-Staubes in mg/m³ in den drei untersuchten Städten. Unter den Mittelwerten ist der jeweilige Median in Klammern dargestellt. Die Zusammenfassung der einzelnen Messabschnitte erfolgt entsprechend der Eigenschaften der jeweiligen Messabschnitte

	Gießen					Marburg					Wetzlar				
Verkehrsbelastung	Teilchen /cm³	T-Staub mg/m³	E-Staub mg/m³	Kfz /24h	Mess- abschnitte	Teilchen /cm³	T-Staub mg/m³	E-Staub mg/m³	Kfz /24h	Mess- abschnitte	Teilchen /cm³	T-Staub mg/m³	E-Staub mg/m³	Kfz /24h	Mess- abschnitte
Innenstadt, Hauptverkehrsstraße	58.243 (49.782)	0,0127 (0,0111)	0,0453 (0,0344)	~ 22.625	2/3 ; 3/4, 4/5 ; 5/6	53.776 (48,645)	0,0066 (0,0054)	0,0408 (0,0337)	~ 10.000	1/2 ; 3/4	40.341 (33.818)	0,0231 (0,0194)	0,0441 (0,0314)	~ 18.500	1/2 ; 2/3 8/9 ; 9/1
Innenstadt, verkehrsberuhigter Bereich	/	/	/	/	/	47.030 (42.332)	0,0070 (0,0054)	0,0466 (0,0403)	~ 9.600	2/3 ; 4/5 5/6	/	/	/	/	/
Ein- bzw. Ausfallstraße	63.067 (51.706)	0,0127 (0,0114)	0,0416 (0,0318)	~ 15.000	1/2 ; 6/7	/	/	/	/	/	30.158 (22.164)	0,0257 (0,0194)	0,0529 (0,0280)	~ 13.000	5/6
Autobahnzubringer	52.845 (42.696)	0,0062 (0,0054)	0,0237 (0,0163)	~15.000	9/1	56.425 (46.223)	0,0073 (0,0055)	0,0412 (0,0338)	~ 14.000	7/8	33.360 (25.162)	0,0232 (0,0207)	0,0472 (0,0284)	~ 16.000	6/7
Autobahnabschnitt	160.856 (160.018)	0,0675 (0,0770)	0,0902 (0,0870)	~ 55.000	8/9	42.898 (40.393)	0,0055 (0,0053)	0,0215 (0,0193)	~ 33.500	8/9	37.835 (34.172)	0,0319 (0,0284)	0,0607 (0,0478)	~ 18.000	7/8
Stadtrandlage	49.200 (38.849)	0,0266 (0,0207)	0,0553 (0,0470)	~ 8.000	7/8	63.185 (50716)	0,0062 (0,0055)	0,0435 (0,0373)	~ 8.500	6/7	22.417 (15.727)	0,0242 (0,0224)	0,0504 (0,0299)	~ 10.000	3/4
Wohngebiet	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	21.898 (17.729)	0,0195 (0,0180)	0,0350 (0,0235)	< 8.000	4/5

Tabelle 26 zeigt die Staubbelastungen in Anzahl und Masse der untersuchten Staubteilchen geordnet nach einzelnen Verkehrsbereichen. Des Weiteren wird die auch Verkehrsbelastung der entsprechenden Bereiche aufgeführt.

Dabei ist erkennbar, dass vor allem die Teilchenanzahl gute Übereinstimmungen in den einzelnen Verkehrsbereichen liefert. Sowohl in der Innenstadt von Gießen mit 58.243 Teilchen/cm³ und Marburg mit 53.776 Teilchen/cm³ als auch in der Stadtrandlage von Gießen mit 49.200 Teilchen/cm³ bzw. Marburg mit 63.185 Teilchen/cm³ und im Bereich der Autobahnzubringer mit 52.845 Teilchen/cm³ bzw. 56.425 Teilchen/cm³ stimmen die gemessenen Partikelkonzentrationen in Gießen und Marburg überein. Vergleichbar ist hier bis auf den Innenstadtbereich auch die Anzahl der Kraftfahrzeuge pro Tag. Die Messtage in Wetzlar liefern über alle Verkehrsbereiche deutlich geringere Partikelkonzentrationen bei jedoch vergleichbaren Verkehrsbelastungen.

Auffällige Abweichungen der Partikelanzahlen zeigt Tabelle 26 für zwei Bereiche: Die „Stadtrandlage“ in Marburg liefert bei einem vergleichsweise geringem Kfz-Aufkommen von ungefähr 8.500 Fahrzeugen in 24 Stunden mit einem Messwert von über 60.000 Teilchen/cm³ die höchsten Teilchenbelastungen dieser Stadt. Eine solch hohe Belastung ist durch eine vergleichsweise geringe Kfz-Anzahl alleine nicht erklärbar. Die Ursache ist auf weitere andere Partikelquellen zurückzuführen. Ein Extremwert findet sich auf dem Gießener Autobahnring mit über 160.000 Teilchen/cm³. Dieses Ergebnis liegt deutlich oberhalb der übrigen Messwerte. Vergleichbare Partikelanzahlen der Autobahnabschnitte in Marburg und Wetzlar liegen mit etwa 38.000 bzw. 43.000 Teilchen/cm³ um Größenordnungen niedriger.

Die extreme Abweichung ist hier auf eine höhere Kfz Anzahl zurückzuführen. Die Autobahn A485 in Gießen wird mit 55.000 Kfz in 24 Stunden gegenüber den anderen Stadtautobahnabschnitten in Marburg mit 33.500 und in Wetzlar mit 18.000 Kfz in 24 Stunden deutlich stärker frequentiert. Es handelt sich zudem um den einzigen offiziell als „Autobahn“ ausgewiesenen Streckenabschnitt. Die „Stadtautobahnen“ von Marburg und Wetzlar erfüllen dort zwar einen vergleichbaren Zweck, sind jedoch trotz des im Vergleich zu den jeweiligen Innenstädten hohen Verkehrsaufkommens lediglich als „Bundesstraßen“ ausgewiesen mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 100 km/h. Dementsprechend handelt es sich bei den Probenahmen auf der Autobahn in Gießen um

den einzigen Abschnitt ohne Geschwindigkeitsbegrenzung. Infolge höherer Geschwindigkeiten und den damit verbundenen Beschleunigungen bei starkem Verkehrsaufkommen steigt die Anzahl der emittierten Partikel deutlich an.

Bei Betrachtung der Massenbelastungen wird deutlich, dass eine vergleichbar gute Zuordnung zwischen den Messergebnissen und dem Verkehrsaufkommen nicht ableitbar ist. Innerhalb vergleichbarer Verkehrsbereiche weichen die Massenbelastungen bei ähnlichem Verkehrsaufkommen um ein Mehrfaches voneinander ab. So werden beispielsweise auf den Autobahnzubringern in Gießen mit $0,0062 \text{ mg/m}^3$ im T-Staub und $0,0237 \text{ mg/m}^3$ im E-Staub, in Marburg mit $0,0073 \text{ mg/m}^3$ im T-Staub und $0,0412 \text{ mg/m}^3$ im E-Staub und in Wetzlar mit $0,0232 \text{ mg/m}^3$ im T-Staub und $0,0472 \text{ mg/m}^3$ im E-Staub gemessen.

Gleichzeitig werden im Bereich der Hauptverkehrsstraßen der drei Innenstädte bei einem Verkehrsaufkommen welches sich um mehr als das Doppelte unterscheidet fast identische Staubmassen registriert: E-Staub in Marburg $0,0408 \text{ mg/m}^3$, in Gießen $0,0453 \text{ mg/m}^3$ und in Wetzlar $0,0441 \text{ mg/m}^3$.

Weitere auffallende Ergebnisse zeigen sich in Wetzlar; hier weisen die Stadtrandlage und die Ein-/Ausfallstraße bei niedrigerem Verkehrsaufkommen höhere Staubbelastungen in T-Staub mit $0,0242 \text{ mg/m}^3$ bzw. $0,0257 \text{ mg/m}^3$ und E-Staub mit $0,0504 \text{ mg/m}^3$ bzw. $0,0529 \text{ mg/m}^3$ auf als die stärker befahrenen Bereiche in der Innenstadt-Hauptverkehrsstraße bzw. dem Autobahnzubringer mit $0,0231 \text{ mg/m}^3$ bzw. $0,0232 \text{ mg/m}^3$ im T-Staub und $0,0441 \text{ mg/m}^3$ bzw. $0,0472 \text{ mg/m}^3$ im E-Staub.

Erwartungsgemäß sind auf den Autobahnabschnitten die höchsten Massenbelastung zu finden. In Gießen liegen die Staubbelastungen mit $0,0675 \text{ mg/m}^3$ für den T-Staub und $0,0902 \text{ mg/m}^3$ für den E-Staub erwartungsgemäß oberhalb aller anderen Verkehrsbereiche. Das Gleiche gilt für Wetzlar mit $0,0319 \text{ mg/m}^3$ in der T-Fraktion und $0,0617 \text{ mg/m}^3$ in der E-Fraktion, nicht hingegen für Marburg. In Marburg werden auf der Stadtautobahn $0,0055 \text{ mg/m}^3$ für den T-Staub und $0,0215 \text{ mg/m}^3$ für den E-Staub registriert. Dieses Ergebnis liegt, im Gegensatz zu denen aus Gießen und Wetzlar, unterhalb aller anderen Werte in der jeweiligen Stadt und kann nicht durch die Kfz-Belastung erklärt werden. So fanden sich auch in Gießen in der ruhigen Stadtrandlage mit $0,0266 \text{ mg/m}^2$ für den T-Staub und $0,0553 \text{ mg/m}^3$ für den E-Staub höhere Staubmassen

als z.B. auf der Hauptverkehrsstraßen der Innenstadt mit 0,0127 mg/m³ im T-Staub bzw. 0,453 mg/m³ im E-Staub.

In Marburg liegen die ermittelten Massenbelastungen in etwa um eine Zehnerpotenz unterhalb der Massenkonzentrationen von Gießen oder Wetzlar. Erst bei detaillierter Betrachtung wird deutlich, dass auch bei einzelnen Messrunden in Gießen und in Marburg vergleichbare Staubkonzentrationen gefunden wurden, siehe hierzu die Messtage Nummer 1 und 2 bzw. Nummer 8 der Kapitel 3.2.3., 3.2.4., 3.2.5. Die höheren Werte für Gießen und Wetzlar in Tabelle 26 ergeben sich überwiegend durch Mittelung bei Einbeziehung der Messtage Nr. 3 bzw. Nr. 7 mit sehr hohen Belastungsintensitäten.

4.4.1. Zusammenfassung der Teilchenanzahl

Der Parameter „Teilchenanzahl“ korreliert am engsten mit der Belastung durch Kfz. Hohe Geschwindigkeiten (zulässige Geschwindigkeiten über 100 km/h) und eine hohe Anzahl von Fahrzeugen führt zu einer hohen Partikelkonzentration. Die Unterschiede der Partikelanzahl in einer Größenordnung in Gießen bzw. Marburg gegenüber Wetzlar sind hierauf zurückzuführen.

Steigende Partikelbelastungen bei gleichbleibender Verkehrsbelastung (vgl. Abbildung 25 sowie Abbildung 26) oder Messabschnitte mit deutlich erhöhter Belastung ohne eine entsprechende Kraftfahrzeuganzahl zeigen aber, dass einzelne Messrunden dies aufgrund der Spannbreite der Messungen nicht ausreichend abbilden können. Zur Ermittlung des Ausmaßes einer stadtspezifischen Belastung sind daher vergleichende Messungen an mehreren Punkten bzw. Strecken eines Gebietes erforderlich.

4.4.2. Zusammenfassung der Massenkonzentration

Die Auswertung der A-Fraktion ist auf Grund der zu geringen Staubmasse dieser Fraktion nicht möglich. Eine Korrelation der Ergebnisse von T- und E-Fraktion kann nicht nachgewiesen werden, beide Fraktionen sind zudem wenig von der Verkehrsbelastung abhängig. Das zeigen vor allem unauffällige Messwerte an Verkehrsschwerpunkten mit hohem KFZ-Aufkommen (vgl. Kapitel 4.1.4). Zwischen den Städten Gießen, Marburg und Wetzlar gibt es kaum Unterschiede. Auch innerhalb der Städte werden Bereichen mit

hoher und geringer Verkehrsbelastung wie Autobahnabschnitte, Innenstadt- oder Stadtrandlagen nicht ausreichend diskriminiert. Messergebnisse an verschiedenen Tagen unter gleichen äußeren Bedingungen weichen erheblich voneinander ab. Dies kann nicht allein auf den Kfz Verkehr zurückgeführt werden.

5. Diskussion

5.1. Toxikologische Bewertung der untersuchten Partikel

Die gesundheitlichen Auswirkung von Stäuben ist abhängig von multiplen Faktoren. Neben der Zusammensetzung und der damit verbundenen spezifischen Toxizität des jeweiligen Stoffes ist insbesondere der Ort der Ablagerung entscheidend (Rödelsperger et al. 2007). Einatembare Partikel zwischen 10 µm und 2,5 µm werden durch Flimmer-epithelien in den oberen Atemwegen abgefangen und abgehustet. Lungengängige Partikel zwischen 2,5 µm und 0,1 µm dringen in die kleineren Bronchien und Bronchiolen vor und werden im Laufe mehrerer Wochen über die mukoziliäre Clearance abtransportiert. Ultrafeine Partikel einer Größe von $\leq 0,1$ µm gelangen bis in die Alveolen. Dort werden sie deponiert, von Phagozyten aufgenommen oder über die Lymphbahnen bzw. das Blut in weitere Organsysteme des Körpers transportiert.

Während abgesonderte Partikel in den oberen Atemwegen Umweltallergien wie Heuschnupfen initiieren können, geht von in der Lungenperipherie deponierten Partikeln eine größere Gefahr aus. Diese besteht dabei nicht nur in einer möglichen stoffspezifischen Kanzerogenität. Vielmehr initiieren sie durch das Auftreten in großer Anzahl einen Partikeleffekt, welcher über die Aktivierung von Makrophagen und chronischen Entzündungsprozessen zur Entstehung reaktiver Sauerstoffverbindungen (ROS) führt. Diese haben das Potential oxidative DNA Schäden auszulösen welche eine (pulmonale) Malignomentstehung begünstigen.

Pathophysiologisch wird dieser Mechanismus für granulär biobeständige Stäube mit langer Verweildauer in den Lungen beschrieben. Zu diesen gehören die Dieselmotoremissionen. Letztere stehen schon seit langem im Verdacht Lungenkrebserkrankungen zu verursachen. Der beschriebene Pathomechanismus wird auch für die im Straßenverkehr emittierten Dieselrußpartikel nachgewiesen (Muhle et al. 1991). Für die untersuchten Partikel der luftgetragenen Stäube in der Umwelt ist damit die Eindringtiefe in den menschlichen Körper ein wesentlicher Faktor zur Bestimmung des toxikologischen Risikos.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte anhand von Staubbmessungen im Bereich der Umwelt eine Überprüfung der Belastung mit feinen bzw. ultrafeinen Stäuben im Straßenverkehr erfolgen. Neben den massebezogenen Messverfahren wird die Bestimmung der

Teilchenanzahl erforderlich, da kleine Partikel und hier insbesondere Nanoteilchen, wozu Rußpartikel aus Dieselmotoremissionen gehören kaum zu einer Massebelastung beitragen.

Bei der Beurteilung der untersuchten Messmethoden zur Überwachung von Stäuben zeigen sich anhand der beschriebenen Toxikologie damit klare Nachteile für die Methode der Bestimmung der Partikelmasse gegenüber der Partikelanzahl: Die potentiell gefährlichsten Partikel werden hier deutlich vernachlässigt und im Vergleich zu massereichen Partikeln mit deutlich geringerer Toxizität fast nicht abgebildet: Einem einzelnen großen, gerade noch von der PM₁₀-Fraktion erfassten Staubeilchen mit relativ großer Masse wird die gleiche pathogene Relevanz zugeschrieben wie fast 500.000 der kleinsten Teilchen. Im Rahmen von Massenkonzentrationsbestimmungen werden 99,9998% der toxikologisch wirksameren Partikel einem einzelnen massereichen Teilchen gleichgesetzt und deren größere Gefahr bezüglich einer Entstehung von Malignomen und weiteren Erkrankungen praktisch ignoriert.

Ein Vergleich beider Methoden erscheint angebracht, wenn einerseits die vorgegebenen massebasierten Grenzwerte der Staubb Belastung durch im Straßenverkehr vorherrschende Dieselrußpartikel weitgehend eingehalten werden (Umweltbundesamt 2016), andererseits laut aktuellen Untersuchungen gut ein Viertel der Todesfälle durch Feinstaubbelastung in Deutschland auf den Straßenverkehr zurückzuführen ist (Lelieveld, 2015).

Das Ziel dieser Arbeit war es, herauszufinden ob für Stäube im Straßenverkehr eine Überwachung weiterer Qualitäten zusätzliche Informationen zur Abschätzung von Gesundheitsgefahren erbringen kann. Neben der behördlich etablierten Methode der PM₁₀-Überwachung wurden dazu insbesondere die Anzahl der Partikel überprüft sowie die in der Arbeitsmedizin etablierte Bestimmung der alveolengängigen (A-), einatembaren (E-) und thoraxgängigen (T-) Staubfraktionen vorgenommen. Dazu wurden mehrfache Messungen im Umfeld dreier hessischer Städte mittlerer Größe durchgeführt.

5.2. Teilchenanzahl

Die Bestimmung der Partikelanzahl ist ein in der Arbeitsmedizin etabliertes Verfahren. Dabei werden alle luftgetragenen Partikel unterhalb einer bestimmten Abscheidungsgröße registriert.

Im Fall der durchgeführten Messungen liegt diese Größe bei 0,01 bis $< 1 \mu\text{m}$ und es können zwischen 1 und 500.000 Teilchen/cm³ erfasst werden. Dabei kann keine Aussage getroffen werden, in wie weit sich die registrierten Partikel hinsichtlich Ihres Volumens, ihrer Masse oder der chemischen Zusammensetzung unterscheiden. Agglomerate einzelner Primärpartikel werden als einzelne Teilchen registriert.

Wie im Ergebnisteil in Kapitel 4.4. und 4.4.1. dargelegt korreliert die Anzahl der gemessenen Partikel deutlich und reproduzierbar mit dem Verkehrsaufkommen. So konnten in Gießen mit 58.243 Teilchen/cm³ bzw. Wetzlar mit 40.341 Teilchen/cm³ in der Innenstadt deutlich höhere Partikelkonzentrationen bestimmt werden als in den Stadtrandlagen mit 49.200 Teilchen/cm³ in Gießen bzw. 22.417 Teilchen/cm³ in Wetzlar. Gleiches zeigt sich für Marburg mit 53.776 Teilchen/cm³ im Hauptverkehrsbereich der Innenstadt bzw. 47.030 Teilchen/cm³ im verkehrsberuhigten Bereich. Diese Korrelation kann dabei nicht nur mit der Anzahl der vorhandenen Kfz aufgezeigt werden, auch die gefahrenen Geschwindigkeiten haben einen deutlichen Einfluss auf die gemessene Partikelanzahl. Eindrücklich deutlich wird dies auf dem Autobahnabschnitt in Gießen, der bei den höchsten gefahrenen Geschwindigkeiten aller Messabschnitte dieser Arbeit mit 160.856 Teilchen/cm³ als einziger die Marke von 100.000 Teilchen/cm³ überschreitet und damit alle anderen Messabschnitte um mehr als das doppelte übertrifft.

5.3. Massenkonzentration

Die Erfassung der Massenkonzentration ist das in der Umweltüberwachung übliche Messverfahren zur Bestimmung von Staubkonzentrationen. Hier werden alle luftgetragenen Staubpartikel kleiner $100 \mu\text{m}$ erfasst. Die einatembare E-Fraktion entspricht dabei Partikeln unter $100 \mu\text{m}$, die thoraxgängige T-Fraktion unter $10 \mu\text{m}$ und die alveolengängige A-Fraktion Partikeln mit $< 4 \mu\text{m}$. Die Messungen erlauben nicht nur die Ermittlung der Gesamtmasse, sondern auch der jeweiligen Massen der einzelnen Staub-Fractionen. Das Messverfahren lässt keine weiteren Rückschlüsse über die Partikelanzahl oder das Volumen der registrierten Partikel zu.

Die Untersuchungen zeigten, dass die alveolargängige A-Fraktion mithilfe der etablierten Messtechnik kaum zur Massebelastung beiträgt. Nahezu sämtliche von uns

durchgeführten Staubmessungen lagen unterhalb der Nachweisgrenze. Dies liegt daran, dass die A-Fraktion im Bereich umweltmedizinischer Messungen überwiegend durch ultrafeine Rußpartikel aus Dieselmotoremissionen besteht, die kaum zur relevanten Massebelastung beitragen (vgl. Kapitel 2.3.). Infolge verbesserter Motorentechiken mit Abgasnachbehandlungen nimmt der Anteil ultrafeine Partikel weiter zu, die sich somit dem Detektionsbereich der Messgeräte für die alveolengängige Staubfraktion entziehen (unter $0,005 \text{ mg/m}^3$). Lediglich einzelne kurzfristige Überschreitungen der unteren Nachweisgrenze, wie z.B. auf einer Ausfallstraße in Wetzlar an Messtag Nr. 7 in Messabschnitt 5/6 (vgl. Kapitel 4.3.2.) konnten von uns festgestellt werden. Das Gefahrenpotential durch die ultrafeinen Partikel in der Umwelt kann unseres Erachtens hierdurch nicht adäquat abgebildet werden.

Mit den eingesetzten Messmethoden konnten jedoch relevante Staubfraktionen für den thoraxgängigen (T-) und den einatembaren Staub (E-Staubfraktion) gemessen werden. Für diese beiden T- sowie E-Staub-Fraktionen konnte jedoch keine Korrelation zum Verkehrsaufkommen nachgewiesen werden. Beide scheinen weitgehend unabhängig von der Verkehrsbelastung zu sein. Eine Unterscheidung verschiedener Verkehrsbereiche wie Hauptverkehrsstraßen (z.B. Gießen mit $0,0127 \text{ mg/m}^3$ im T-Staub bzw. $0,453 \text{ mg/m}^3$ im E-Staub) oder verkehrsberuhigte Wohngebiete (z.B. Gießen mit $0,0266 \text{ mg/m}^3$ für den T-Staub und $0,0553 \text{ mg/m}^3$ für den E-Staub) ist durch eine Überwachung der Massenkonzentration hiermit nicht möglich. Auffallend war, dass an verschiedenen Messtagen bei gleicher Verkehrsbelastung und ähnlichen Witterungsbedingungen (bezüglich Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit) deutliche Abweichungen um mehr als eine Größenordnung auftraten (Gießen Messtag Nr. 4: T-Staub $0,764 \text{ mg/m}^3$ sowie E-Staub $0,989 \text{ mg/m}^3$; Messtag Nr. 5: T-Staub $0,100 \text{ mg/m}^3$ sowie E-Staub $0,289 \text{ mg/m}^3$), die nicht mit dem Verkehrsaufkommen korrelierten.

5.4. Messungen des HLUg

Die stationäre Überwachung der luftgetragenen Belastung durch Staubpartikel wird durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie an bestimmten Verkehrsschwerpunkten innerstädtisch durchgeführt. Das HLUg unterhält hessenweit verteilt siebenunddreißig Staubmessstationen zur Bestimmung der Partikelmasse der

PM₁₀-Fraktion. Diese teilen sich nach ländlichen-, städtischen- und Messpunkten an Verkehrsschwerpunkten auf. Im Bereich der drei untersuchten Städte befinden sich insgesamt vier der siebenunddreißig Messstationen. In Gießen und Marburg befinden sich dabei jeweils eine Station an einem definierten Verkehrsschwerpunkt.

Wie bei der Bestimmung der Massenkonzentration durch eigene Messungen kann auch bei der Analyse der behördlichen Umweltmessungen kein eindeutiger Bezug zu der vorhandenen Verkehrsbelastung aufgezeigt werden. So weichen z.B. die registrierten Staubmassen der HLUG-Messstation in Gießen unter vergleichbaren äußeren Bedingungen mit Ø 0,0326 mg/m³ an Messtag Nr. 2 und Ø 0,0525 mg/m³ an Messtag Nr. 3 erkennbar voneinander ab. Gleichzeitig zeigen die beiden Messstationen in Marburg an Messtag Nr.6, in unmittelbarer Entfernung zueinander bei jedoch deutlich abweichendem Verkehrsaufkommen mit 0,049 mg/m³ (Verkehrsschwerpunkt) und 0,033 mg/m³ (verkehrsberuhigter Bereich) geringere Abweichungen auf.

Dies zeigt, dass die durch den Straßenverkehr freigesetzten nanoskaligen Partikel auf Grund ihrer geringen Masse durch die verwendete Messtechnik der HLUG nicht adäquat dargestellt werden können. Die von der HLUG registrierten Partikel sind massereicher und haben einen anderen, verkehrsunabhängigen Ursprung.

Deutlich wird dies auch, beachtet man die Anzahl der erlaubten Überschreitungen des PM₁₀-Tageshöchstwertes für die Messstation Gießen. Diese liegen bei 18 Tagen in 2014, 11 Tagen in 2015, 0 Tagen in 2016 und 8 Tagen in 2017 (Docter 2018). Diese Variation kann, insbesondere die nicht vorhandene Überschreitung der Grenzwerte in 2016 weder durch ein verändertes Verkehrsaufkommen noch durch eine technische Erneuerung der Emissionsquellen im Sinne einer veränderten Emission erklärt werden.

All dies lässt darauf schließen, dass die bestimmbare Masse der PM₁₀-Fraktion in der Umwelt vor allem durch Kfz-unabhängige Partikel gebildet wird. Durch Kraftfahrzeuge verursachte ultrafeine Partikel gehen auf Grund Ihrer vergleichsweise sehr geringen Masse in der Gesamtheit der detektierten PM₁₀-Partikel unter. Eine Überwachung der seit 1997 etablierten PM_{2,5}-Fraktion dürfte hier eine bessere Korrelation zu dem vorhandenen Verkehrsaufkommen liefern, da die ultrafeine Partikel gegenüber der aktuellen Überwachung der PM₁₀ Fraktion deutlich stärker gewichtet würden.

5.5. Einordnung in den aktuellen Zusammenhang

Die Frage nach gesundheitlichen Auswirkungen von Stäuben in der Umwelt ist nicht zuletzt durch die seit 2015 bekannt gewordenen Manipulationen mehrerer Automobilhersteller an Abgassystemen erneut in den Mittelpunkt des öffentlichen Interesses geraten. Besonders die seit 2017 diskutierten innerstädtischen Fahrverbote in mehreren deutschen Großstädten aufgrund erhöhter Stickoxidwerte und den damit in Verbindung stehenden obstruktiven Ventilationsstörungen drängen jedoch das Abgasproblem um den Ausstoß ultrafeiner Partikel in den Hintergrund.

Dabei konnten seit Einführung der Richtlinie 91/441/EWG (Euro 1) 1992 und deren Anpassungen bis hin zur aktuellen Euro 6 Norm in 2015 bereits deutliche Fortschritte im Bereich der Partikelbelastung erreicht werden. Zum einen konnte die Masse der freigesetzten Rußpartikel mit der flächendeckenden Einführung des Rußpartikelfilter für Diesel-PKW vor ungefähr 15 Jahren eindrücklich reduziert werden und liegt heute bei Fahrzeugen neuer Abgasnorm deutlich unterhalb der geforderten Grenzwerte (Hebisch 2017).

Anhand unserer Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass die Messungen zur Partikelmasse im Bereich weniger $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Atemluft liegen.

Dies geht jedoch nicht zwangsläufig mit einer Reduzierung der Partikelkonzentration einher. So fand sich keine Korrelation zwischen Verkehrsaufkommen und Massenbelastung in unseren Messungen wieder. Mit Einführung der Euro 5b Norm in 2011 wurde für Pkw mit Dieselmotoren zudem erstmals ein Grenzwert für die erlaubte Partikelanzahl pro gefahrenem Kilometer festgelegt, welcher auch mit Einführung der aktuellen Euro 6 Norm nicht weiter verändert wurde. Bei funktionierenden Dieselpartikelfiltern neuester Generation werden Partikelanzahlkonzentrationen erreicht, die im Bereich der Hintergrundbelastung und damit deutlich unterhalb der erlaubten Partikelkonzentrationen von $6 \cdot 10^{11}$ pro gefahrenem Kilometer liegen sollten (Fiebig 2013). Zum anderen konnte auch die Entwicklung im Bereich der eingesetzten Dieselmotoren eine Reduktion der freigesetzten Partikel (Masse sowie Anzahl) erreichen (Krahl 2017), die bisher noch nicht vollkommen ausgeschöpft zu sein scheint (Krahl 2017).

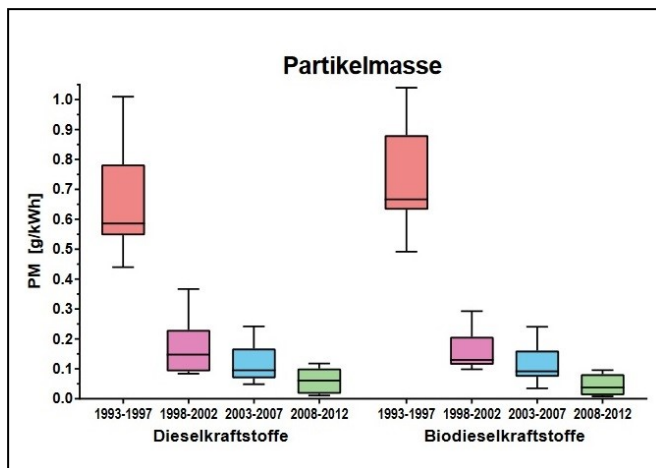


Abbildung 31: Reduktion der Partikelmasse im Dieselaabgas im Zeitverlauf (modifiziert nach Bünger 2013)

Abbildung 31 zeigt beispielhaft, wie der Ausstoß der Partikelmasse durch die Entwicklung der Dieselmotoren in den letzten 25 Jahren reduziert werden konnte.

Weitgehend ignoriert wurde in der öffentlichen Diskussion bislang die Freisetzung von Staubpartikeln durch Kfz mit Ottomotoren. Während die freigesetzte Masse der Emissionen hier als unkritisch anzusehen ist, werden gerade durch spritsparende Motoren mit Direkteinspritzung vermehrt ultrafeine Partikel freigesetzt (UBA 2017). Für Benzinmotor wurde erstmals 2014 ein Grenzwert festgelegt, welcher die Anzahl der erlaubten Partikel auf $6 \cdot 10^{12}$ Teilchen pro gefahrenem km begrenzt. Dieser lag damit jedoch um eine Potenz höher als bei Dieselmotoren und wurde außerhalb der vorgeschriebenen Prüfzyklen im Realbetrieb häufig deutlich überschritten (ADAC 2016). Erst seit wenigen Monaten (01.09.2017) ist dieser Wert für Neufahrzeuge im Rahmen der Einführung der Euro 6c Norm auf $6 \cdot 10^{11}$ Teilchen pro km angepasst worden. Das Erreichen dieser Grenzen ist – analog zu Dieselfahrzeugen – ohne die bereits vorhandene Technik der Partikelfilter für Ottomotoren kaum noch möglich (Fiebig 2013).

5.6. Bedeutung für die Prévention

Die Überwachung der in der Umwelt vorkommenden Staubbelastung durch die Messung von PM_{10} ist ein seit Jahrzehnten praktiziertes und etabliertes Verfahren. Bei den behördlichen Messungen werden neben ländlichen Regionen insbesondere

Verkehrsschwerpunkte überwacht. Damit soll die Gefährdung der Bevölkerung durch Staubpartikel, die von Kraftfahrzeugen verursacht werden, quantifiziert werden. Seit der deutschlandweiten Einführung dieser Messungen im Jahr 2000 haben sich jedoch einige Voraussetzungen entscheidend geändert.

Einerseits zeigen Forschungsergebnisse, dass von den kleinsten Partikeln der PM₁₀-Fraktion das größte Gefahrenpotential ausgeht (DFG 2012) (Schneider 2013), sodass auch das internationale Krebsforschungszentrum IARC (International Agency for Research on Cancer) Feinstaub im Jahr 2013 offiziell als Verursacher von Lungenkrebs eingestuft hat (IARC, 2013).

Andererseits hat sich die Partikelbelastung durch Kraftfahrzeuge im gleichen Zeitraum dramatisch verändert (Hebisch 2017). Durch die Anpassung an immer schärfere Abgasnormen erfolgte eine technische Weiterentwicklung von Motoren an deren Ende die Emissionen von damals und heute kaum vergleichbar erscheinen. Nachdem vor über zehn Jahren bereits die Masse der freigesetzten Dieselrußpartikel mittels Partikelfiltern deutlich gesenkt werden konnte, ist seit wenigen Jahren auch die Anzahl der durch Dieselmotoren abgesonderten ultrafeinen Partikel durch den Einsatz der verwendeten Rußpartikelfilter rückläufig (Fiebig 2013, Bünger 2013). Benzinmotoren wurden als unkritisch in Bezug auf die freigesetzte Partikelmasse angesehen. Dies ist jedoch wegen der hohen Partikelanzahl nicht zu halten. Gerade bei steigenden Zulassungszahlen (KBA 2017) ist hierdurch eine besonders hohe Partikelbelastung zu erwarten. Aufgrund der toxikologischen Eigenschaften ultrafeiner Partikel ist eine präventive Maßnahme zur Verminderung der aktuell noch hohen Partikelanzahlen baldmöglichst erforderlich.

Bezieht man die Ergebnisse dieser Arbeit auf die zuvor dargestellte, aktuelle Situation, so ergeben sich zwei wesentliche Aussagen für die Prävention:

Einerseits konnten unsere Messungen keine ausreichende Korrelation zwischen dem Verkehrsaufkommen und der vorhandenen Masse an Partikeln in der Luft aufzeigen. Dies ist glaubwürdig, betrachtet man weitere Untersuchungen, in denen gezeigt wurde, dass das Aufkommen des Feinstaubes in den Jahren 2000 bis 2015 um ca. 40 % abgenommen hat (Zimmermeyer 2017). Die verkehrsbedingten Emissionen von PM₁₀ konnten in den Jahren 1993 bis 2013 mit Anpassung an die verschiedenen EURO Normen durch verschiedenste Entwicklungen (Motorenteknik, Kraftstoffentwicklung, Abgasnachbehandlung) sogar um mehr als 90 % reduziert werden (Bünger 2013).

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass der Anteil des verkehrsbedingten Feinstaubes in Umweltmessungen heutzutage bei unter 20 % des Gesamtfeinstaubes liegt und damit vergleichbar mit z.B. dem Anteil an organischem Material (Hamburger Institut für Umwelt und Hygiene 2008). Die verkehrsbedingte Masse der Feinstaubemissionen ist zusammengefasst heute so gering, dass sie sich, wie unsere Messungen zeigen unter der vorhandenen Hintergrundbelastung nicht mehr adäquat abbilden lässt.

Für die Prävention bedeutet dies, eine Fortsetzung der Überwachung des Verkehrsaufkommens ausschließlich mittels PM_{10} ist nicht mehr zeitgemäß. Zu dem gleichen Ergebnis kommen auch die Autoren anderer Publikationen mit der Bewertung, „dass eine Verknüpfung der Feinstaubbelastung [PM_{10}] mit der Rußemission aus dem Straßenverkehr nicht sinnvoll ist“ (Zimmermeyer 2017).

Andererseits konnte in unsere Untersuchungen eine gute Korrelation für die Anzahl der vorhandenen Staubpartikel und das Verkehrsaufkommen nachgewiesen werden. Für die Prävention bedeutet dies, dass selbst bei zunehmend strengeren Grenzwerten für die Anzahl der erlaubten Partikelemissionen in naher Zukunft, eine Überwachung des Verkehrsaufkommens mittels dieser Methode angeraten wird. Dies gilt neben den Fahrzeugen mit Dieselmotoren auch und insbesondere für Kraftfahrzeuge mit Ottomotoren. Dies ist wesentlich, da gerade durch den zunehmenden Anteil von Fahrzeugen mit Ottomotoren bei den Neuzulassungen (KBA 2017) in Zukunft eine vermehrte Freisetzung von Nanopartikeln zu erwarten ist.

6. Zusammenfassung

Tagtäglich ist der menschliche Organismus Stäuben unterschiedlicher Größe und Form aus verschiedensten Quellen ausgesetzt. Feine Partikel werden inhaliert und können respiratorische und kardiovaskuläre Erkrankungen verursachen.

In dieser Arbeit wurde untersucht, ob für Stäube im Straßenverkehr eine Überwachung weiterer Qualitäten zusätzliche Informationen zur Abschätzung von Gesundheitsgefahren erbringen kann.

Die Masse der einatembaren-, thoraxgängigen und alveolengängigen Staubfraktion wurde mittels Respicon gemessen, die Partikelanzahl mittels Kondensationskernzähler (PCP). Es wurden mobile Messungen in verschieden stark befahrenen Straßen dreier Städte durchgeführt, weitere stationäre Messungen erfolgten in Nähe zur HLUG Luftmessstelle Gießen. Die Ergebnisse der behördlichen Messungen (PM_{10} -Konzentration) wurden mit eigenen Messungen verglichen.

Eine Korrelation zwischen Verkehrsaufkommen und Teilchenmasse fand sich nicht. Nanoskalige Rußpartikel, der A-Fraktion zuzuordnen, lagen unterhalb der Nachweisgrenze. Die T- bzw. E-Staubfraktion lag in Gießen an Hauptverkehrsstraßen bei 0,0127 bzw. 0,453 (Angaben jeweils in mg/m^3), in verkehrsberuhigten Bereichen bei 0,0266 bzw. 0,0553. Stationär konnten die Partikelmassen der T- bzw. E-Fraktion mit 0,764 bzw. 0,989 und 0,100 bzw. 0,289 an verschiedenen Messtagen deutliche Abweichungen festgestellt werden. Die PM_{10} -Konzentrationen lagen in Gießen zwischen 0,0326 und 0,0525, in Wetzlar zwischen 0,0375 und 0,0192. In Marburg wurden 0,049 an einem Verkehrsschwerpunkt, zeitgleich im verkehrsberuhigten Bereich 0,033 gemessen. Die Partikelanzahl (Teilchen/ cm^3) korrelierte mit dem Verkehrsaufkommen. In Gießen, Marburg und Wetzlar wurden entsprechend des KFZ-Aufkommens mit 57.243, 53.776 bzw. 40.341 in den Innenstädten mehr Partikel gemessen als in den Stadtrandlagen mit 49.200, 22.417 und 22.417. Mit 160.856 wurden die meisten Partikel auf der Autobahn gemessen.

Das Gesundheitsrisiko ist abhängig von der Anzahl, weniger von der Masse ultrafeiner Partikel. Das Verkehrsaufkommen korreliert mit der Partikelanzahl. Fahrzeuge mit Diesel- aber auch mit moderneren Ottomotoren führen zu einer vermehrten Freisetzung von Nanopartikeln. Die alleinige Messung von PM_{10} stellt keine geeignete Methode zur Überwachung der Emissionen durch den Kfz Verkehr dar.

7. Summary

Day to day the human organism is exposed to particles of different size and shape from various sources. Fine particles are inhaled and can cause respiratory and cardiovascular diseases.

This study investigates whether the monitoring of other particle-qualities in road traffic can provide additional information for the evaluation of health risks.

The mass of the respirable, thoracic and alveolar dust fraction was measured by Respicon and the number of particles by condensation nucleus counter (PCP). Mobile measurements were performed in three cities on roads that varied in traffic volume. Further stationary measurements were performed in the vicinity of the HLUG air monitor station in Gießen. The results of the official measurements (PM_{10} concentration) were compared with own measurements.

A correlation between traffic volume and particle mass was not found. Nanoscale diesel exhaust fumes related to the A fraction were below the detection limit. The T dust fraction in Gießen was 0.0127 and the E dust fraction 0.453 in high-traffic areas (data in mg/m^3), respectively 0.0266 for T dust fraction and 0.0553 for the E dust fraction in low-traffic areas. Stationary measurements found distinct deviations of particle masses of the T and E fractions on different measurement days with 0.764 and 0.989, and 0.100 and 0.289. The PM_{10} concentrations in Gießen were between 0.0326 and 0.0525, and in Wetzlar between 0.0375 and 0.0192. In Marburg 0.049 was detected in an area of particularly high traffic volume compared to 0.033 in a low-traffic area at the same time.

The number of particles (particles/ cm^3) correlated with traffic volume. In line with differences in the number of vehicles, more particles were found in the inner cities of Gießen, Marburg and Wetzlar with 57243, 53776, and 40341, respectively, compared to the respective outskirts with 49200, 22417, and 22417. The largest concentration of particles was measured on the highway.

The medical risk depends rather on the number than the mass of ultrafine particles. The volume of traffic correlates with the number of particles. Vehicles with diesel and modern petrol engines contribute to an increased release of nanoparticles. As a result measurement of PM_{10} on its own is not a suitable method for monitoring emissions released by motor vehicle traffic.

Abkürzungsverzeichnis:

ADAC.....	„Allgemeiner Deutscher Automobil Club“
AfA.....	„Amt für Arbeitsschutz“
BMJV.....	„Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz“
CPC.....	„Condensation Particle Counter“
DECHEMA.....	„Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.“
DEHS.....	„Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat“
DFG.....	„Deutsche Forschungsgemeinschaft“
EPA.....	„Environmental Protection Agency“
GBS.....	„Granulär biobeständige Stäube“
HLUG.....	„Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie“
HLNUG.....	„Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie“
HMUKLV.....	„Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz“
IARC.....	„International Agency for Research on Cancer“
IPAS.....	„Institut und Poliklinik für Arbeits- und Sozialmedizin“
KBA.....	„Kraftfahrt-Bundesamt“

MAK.....„Maximale Arbeitsplatzkonzentration“

PAH.....„Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe“

PM.....„Particulate matters“

ROS.....„Reaktive Sauerstoffverbindungen“

UBA.....„Umweltbundesamt“

WHO.....„Weltgesundheitsorganisation“

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Unterteilung verschiedener Stäube nach Ursprung und Partikelgröße unter umwelthygienischen Gesichtspunkten	4
Abbildung 2: Grafische Darstellung der als PM_{10} einbezogenen Partikel. Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von weniger als $1\ \mu m$ werden vollständig in die Messung mit einbezogen, bei größeren Partikeln wird ein gewisser Prozentsatz gewertet, der mit zunehmender Partikelgröße abnimmt und bei einer Partikelgröße von ca. $15\ \mu m$ schließlich 0 % erreicht. Für die Partikel mit einer Größe von $10\ \mu m$ wird dann eine Abscheidewahrscheinlichkeit von genau 50% angenommen, hier verdeutlicht durch die roten Linien	8
Abbildung 3: Größenbereiche von Partikeln in der Atmosphäre (nach HUG 2012)	10
Abbildung 4: TEM-Aufnahme von Dieselrußpartikeln in einer Vergrößerung mit dem Faktor 40.000. Zu erkennen ist ein Agglomerat aus einer Vielzahl kleinerer Primärpartikel mit einer ungefähren Ausdehnung von $0,8\ \mu m$ (aus Niermeier und Walter, 2015)	12
Abbildung 5: Verteilung der Messstellen des Hessischen Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie (HUG 2015)	16
Abbildung 6: Schematischer Aufbau des Respicon TSI (Firma Hund 2017) zur Ermittlung von alveolengängigem, thoraxgängigem und einatembaren Staub. Die Menge der angesaugten Luft (Q) beträgt $3,11\ l/min$ und unterteilt sich in die Fraktionen	21
Abbildung 7: Platzierung der Probenahmeköpfe für die mobile Probenahme	23
Abbildung 8: Übersicht der einzelnen Messtage in Gießen, Marburg und Wetzlar	25
Abbildung 9: Gegenüberstellung der Partikelmessung des Messabschnittes 4/5 in Messrunde 2 und 3. Die einzelnen, teils steilen Peaks zeigen, wie empfindlich einzelne Belastungen durch kurzzeitig auftretende Partikelquellen (Fahrzeuge) registriert werden	36
Abbildung 10: Grafische Darstellung der Anzahl registrierter Staubpartikel zweier hintereinander absolvierter Messrunden mit dem Kondensationskernzähler. Die Beschreibung der Wegpunkte erfolgt in Kapitel 3.2.3. Messtage in Gießen	37
Abbildung 11: Vergleich der Partikelkonzentrationen der 5 Messrunden an Messtag Nr. 1. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.	38
Abbildung 12: Mittelwerte der Teilchenkonzentrationen An Messtag Nr. 1. Die höchste Teilchenbelastung stellt sich im Abschnitt 8/9 und damit auf der Autobahn dar. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.	39
Abbildung 13: Medianwerte der Teilchenkonzentrationen bei an Messtag Nr. 1. Auch im Median liegt der Innenstadtabschnitt 3/4 unterhalb des Autobahnabschnitts 8/9. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.	40
Abbildung 14: Grafische Darstellung der A-, T- und E-Staubkonzentrationen während des Messtages Nr. 1. Die Daten sind hier über 10 Sekunden gemittelt. Deutlich erkennbar ist die Nachweisgrenze von $0,005\ mg/m^3$, unterhalb derer keine Werte ausgewiesen werden	42
Abbildung 15: Verlauf der A-, T- und E-Konzentrationen einer einzelnen mobilen Messrunde. Die einzelnen Messabschnitte liegen zwischen den oben markierten Wegpunkten 1 bis 9. Deutlich sichtbar sind ausgeprägte Schwankungen im Bereich der größten Partikel (E-Staub), wären diese für die A-Fraktion kaum erkennbar sind. Die Beschreibung der Wegpunkte erfolgt in Kapitel 3.2.3. Messtage in Gießen	43
Abbildung 16: Mittelwerte der Messabschnitte der T-Staubfraktion bei der mobilen Probenahme am 1. Tag. Einzelne Messabschnitte zeigen eine vergleichsweise konstante Belastung (9/1), andere deutlich größere Abweichungen (1/2). Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.	44
Abbildung 17: Mittelwerte der Messabschnitte der E-Staubfraktion bei der mobilen Probenahme am 1. Tag. Im Vergleich zur T-Fraktion ergeben sich größere Schwankungen in den Massekonzentrationen. Die geringsten Abweichungen zeigen Messabschnitte mit vergleichsweise konstantem Verkehrsaufkommen wie der Innenstadtring 3/4 und der Autobahnabschnitt 8/9. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.3.	45
Abbildung 18: Tagesverlauf der HUG PM_{10} Massenkonzentrationen (Westanlage in Gießen) an Messtag Nr. 1	48
Abbildung 19: Stationärer Messtag Nr. 4. Mit Pfeilen eingegrenzt der V-förmige Verlauf im Zeitraum der Parallelmessungen	49
Abbildung 20: HUG Tagesverlaufskurve an Messtag Nr. 5. Mit Pfeilen eingegrenzt der absteigende Verlauf im Zeitraum der Parallelmessungen	49

Abbildung 21: Mittelwerte der Teilchenkonzentrationen an Messtag Nr. 6. Die höchste Teilchenbelastung stellt sich im Messabschnitt 6/7, einer Ausfallstraße aus Marburg bei erlaubten Geschwindigkeiten von bis zu 70 km/h dar. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.	53
Abbildung 22: Medianwerte der Teilchenkonzentrationen an Messtag Nr. 6. Im Gegensatz zum Mittelwert stellt sich hier die höchste Belastung im Messabschnitt 3/4 in der Innenstadt (Hauptverkehrsbereich) dar. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.	53
Abbildung 23: Mittelwerte der T-Staubfraktion in mg/m^3 über die einzelnen Messabschnitte und Messrunden. Deutlich zu sehen ist die geringe Streubreite der Massenkonzentrationen der T-Staubfraktion in den einzelnen Messrunden. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.	57
Abbildung 24: Mittelwerte der E-Staubfraktion in mg/m^3 über die einzelnen Messabschnitte und Messrunden. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.	57
Abbildung 25: HLUG Messwerte der PM_{10} -Staubfraktion in mg/m^3 an der Universitätsstraße. Die schwarzen Pfeile markieren die Zeit der parallelen Messungen. Die rot gestrichelten Pfeile zeigen die Tendenz der Staubb Belastung über 24 Stunden	59
Abbildung 26: HLUG Messwerte der PM_{10} -Staubfraktion in mg/m^3 an der Gutenbergstraße. Die schwarzen Pfeilen markieren die Zeit der parallelen Messungen, die rot gestrichelten Pfeile zeigen die Tendenz der Staubb Belastung in einem Zeitraum von 24 Stunden	59
Abbildung 27: Mittelwerte der Teilchenkonzentrationen in $\text{Teilchen}/\text{cm}^3$ an Messtag Nr. 7. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.5.	63
Abbildung 28: Mittelwerte der Teilchenkonzentrationen in $\text{Teilchen}/\text{cm}^3$ an Messtag Nr. 8. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.5.	64
Abbildung 29: PM_{10} Messwerte in mg/m^3 der HLUG Station in der Gloelstraße an Messtag Nr. 7. Auffällig sind die drei Konzentrationsspitzen im Verlauf der ersten Tageshälfte	68
Abbildung 30: PM_{10} Messwerte in mg/m^3 der HLUG Station in der Gloelstraße an Messtag Nr. 8. Erkennbar ist hier die im Vergleich zum vorherigen Messtag deutlich reduzierte Belastung im Bereich der ersten Tageshälfte	69
Abbildung 31: Reduktion der Partikelmasse im Dieselaabgas im Zeitverlauf (modifiziert nach Bünger 2013)	83

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Größen und hauptsächlichen Anwendungsbereiche der genannten Messparameter (modifiziert nach: AfA 2008). (Die Fraktion „Ultrafein“ bezieht sich hier entsprechend der Kennzeichnung auf den Anwendungsbereich des Umweltschutzes)	9
Tabelle 2: Herkunft der Partikel entsprechend ihres aerodynamischen Durchmessers (HLUG2012)	15
Tabelle 3: Übersicht der einzelnen Fahrten zur mobilen Staubbemessung	24
Tabelle 4: Beispielhafte Einteilung der Gießener Messstrecke in unterschiedliche Belastungsstufen anhand des Verkehrsaufkommens von Kfz in 24 Stunden sowie mittels Ampelanlagen („Stop-and-go“). Die angegebene Anzahl der Kfz gibt das Verkehrsaufkommen der unterschiedlichen Straßen im Bereich eines Messabschnittes zwischen den Wegpunkten wieder (Regierungspräsidium Gießen 2016)	27
Tabelle 5: Übersicht über die Messstrecke in Gießen	29
Tabelle 6: Übersicht über die Messstrecke in Marburg	30
Tabelle 7: Übersicht über die Messstrecke in Wetzlar	31
Tabelle 8: Angaben des HLUG zu den Standorten der Messstationen	32
Tabelle 9: Meteorologische Daten der HLUG Stationen an den einzelnen Messtagen. Die Werte der einzelnen Messorte (Nr. 1-3; 4-5; 6; 7-8) zeigen annähernd identische Witterungsbedingungen	34
Tabelle 10: Werte der Teilchenanzahlmessungen in Gießen in der Übersicht	40
Tabelle 11: Messabschnitte mit den höchsten bzw. geringsten Partikelbelastungen der Messtage Nr. 1 – 3	41
Tabelle 12: Maximale Massenbelastung des A-, T- und E-Staubes der fünf Messtage in Gießen	46
Tabelle 13: Messabschnitte mit den höchsten Massenbelastung bei den mobilen Probenahmen, getrennt nach den verschiedenen Staubfraktionen. Hinter der Nennung des Messabschnitts in dem der jeweilige Höchstwert erreicht wird folgt die zugehörige mittlere Massenkonzentration	47
Tabelle 14: Mittelwerte der Massenkonzentrationen in mg/m^3 aller drei Staubfraktionen über jeweils fünf Messrunden eines mobilen Messtages in Gießen	47
Tabelle 15: Messwerte des HLUG im Zeitraum der Parallelmessungen	50
Tabelle 16: Mittlere Teilchenanzahl und Median in den einzelnen Messrunden an Messtag Nr. 6 in Marburg	54
Tabelle 17: Mittel- und Medianwerte der Massenkonzentrationen in mg/m^3 von T- und E-Staub während der einzelnen Messabschnitte in Marburg. Die Beschreibung der Messabschnitte erfolgt in Kapitel 3.2.4.	56
Tabelle 18: Tabellarische Darstellung der Belastung der einzelnen Messrunden in Mittelwert und Median in mg/m^3 für die T- und E-Staub-Fraktion. Deutlich erkennbar in allen Fraktionen ist die zunehmende Massenbelastung von Messrunde Nr. 1 hin zu Messrunde Nr. 5	58
Tabelle 19: Messwerte der HLUG-Stationen für Messtag Nr. 6 in der Übersicht. Alle Werte in mg/m^3	60
Tabelle 20: Partikelkonzentrationen in $\text{Teilchen}/\text{cm}^3$ der Messtage Nr. 7 und 8 in Wetzlar	63
Tabelle 21: Darstellung der Messabschnitte mit der geringsten und höchsten Partikelbelastung in $\text{Teilchen}/\text{cm}^3$. Angegeben wird der Mittelwert und Median	64
Tabelle 22: Übersicht der Massenkonzentrationen in mg/m^3 an den Messtagen Nr. 7 und 8	66
Tabelle 23: Messabschnitte mit der stärksten Massenbelastung an Messtag Nr. 7 und 8. Alle Werte in mg/m^3	67
Tabelle 24: Mittelwert und Median der Staubfraktionen der Messtage Nr. 7 und 8 über fünf Messrunden. Alle Werte in mg/m^3	67
Tabelle 25: Übersicht der HLUG Messungen in Wetzlar an den Messtagen Nr. 7 und 8	69
Tabelle 26: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Teilchenanzahl in $\text{Teilchen}/\text{m}^3$ sowie des T- und E-Staubes in mg/m^3 in den drei untersuchten Städten. Unter den Mittelwerten ist der jeweilige Median in Klammern dargestellt. Die Zusammenfassung der einzelnen Messabschnitte erfolgt entsprechend der Eigenschaften der jeweiligen Messabschnitte	71

Literaturverzeichnis

Allgemeiner Deutscher Automobil Club: Die umweltfreundlichsten Autos (EcoTest ab September 2016), https://www.adac.de/_mmm/pdf/28842_281575.pdf (Stand 21.12.2017)

Alfaro-Moreno, E., Nawrot, T.S., Abderrahim, N., Rosas, I., Schwarze, P.: Particulate Matter and Nanoparticles Toxicology, BioMed Research International, vol. 2013, Article ID 642974, 2 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/642974> (2013)

Amt für Arbeitsschutz (AfA), Stadt Hamburg: Projektbericht zur Minderung diffuser Staubemissionen an mobilen Brechanlagen, S. 2, (2008)

Bailey, M.R., Fry, F.A., James, A.C.: Long-term retention of particles in the human respiratory tract. J Aerosol Sci 16:295-305 (1985)

Borm, P.J.A., Schins, R.P.F., Albrecht, C.: Inhaled particles and lung cancer, part B: Paradigms and risk assessment. Int. J. Cancer, 110: 3–14. doi: 10.1002/ijc.20064 (2004)

Bünger, J., Westphal, G., Krah, J., Munack, A., Müller, M., Hallier, E.2, Brüning, T.: Dieselmotoren: Emissionen und Effektmaker im Verlauf, Österreichisches Forum Arbeitsmedizin, Ausgabe 02/13 S.13-16 (2013)

Bundesamt für Umwelt (BAFU) der Schweiz: „Feinstaub macht krank“ Broschüre, Bern, S. 3-5 (2005)

Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (BMJV): Fünfunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Kennzeichnung der Kraftfahrzeuge mit geringem Beitrag zur Schadstoffbelastung - 35. BImSchV), 10.10.2006 (http://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_35/BJNR221810006.html) (20.02.2017)

Castell J. V., Donato M. T. und Gómez-Lechón M. J.: Metabolism and bioactivation of toxicants in the lung. The in vitro cellular approach. Exp Toxicol Pathol; 57 Suppl 1: 189-204 (2005)

DIN EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel; Deutsche Fassung EN 481 (1993)

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): Allgemeiner Staubgrenzwert (A-Fraktion) (Granuläre biobeständige Stäube (GBS)), S. 1-78 (2012)

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): Begründung zum Allgemeinen Staubgrenzwert (2014/2001) in TRGS 900, Arbeitsplatzgrenzwerte, Nr. 12 GMBI 2014, 271, Bek. d. BMAS v. 14.2.2014. IIIb 3, 35125 – 5. In: Bekanntmachung von Technischen Regeln (2014)

<http://www.baua.de/cae/servlet/contentblob/664342/publicationFile/47939/900-allgemeiner-staubgrenzwert.pdf> (Stand: 17.01.2017)

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): MAK- und BAT-Werte-Liste 2011, Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe Mitteilung 44, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim (2011)

Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG): Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe: MAK-und BAT-Werte-Liste 2014 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Weinheim (2014)

Docter, F.: Tendenz zeigt weiter nach unten, Gießener Anzeiger vom 19.01.2018 S. 29, (2018)

Europäische Umweltagentur (EUA): Die Umwelt in Europa: Zustand und Ausblick 2015: Synthesebericht, Europäische Umweltagentur, Kopenhagen, S. 127 (2015)

Europäisches Parlament und Rat (EP): Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft, L163/41 – L163/60 (1999)

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex:31999L0030>

(Stand:17.01.2017)

Europäisches Parlament und Rat (EP): Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa, L152/169 - L152/212 (2008)

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32008L0050>

(Stand:17.01.2017)

Ferin, J., Oberdörster, G., Penney, D. P.: Pulmonary retention of ultrafine and fine particles in rats. *Am J Respir Cell Mol Biol* 6: 535-542 (1992)

Fiebig, M., Wiartalla, A., Kolbeck, A., Kiesow, S.: Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln. *Zbl. Arbmed.* 63 Nr.1, S. 4-22 (2013)

Gebel, T.: Dieselmotoremissionen: ein Arbeitsplatzgrenzwert oder mehrere? *Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft - Ausgabe 11-12/2017* S. 467-472 (2017)

Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA): Statuspapier Feinstaub, S. 11-169 (2010)

Ghio A.J., Smith C.B., Madden M.C.: Diesel exhaust particles and airway inflammation, *Curr Opin Pulm Med.* (2012) Mar;18 (2):144-50. DOI: 10.1097/MCP.0b013e32834f0e2a (2012)

Ghio A.J., Sobus J.R., Pleil J.D., Madden M.C.: Controlled human exposures to diesel exhaust, *Swiss Med Wkly.* 2012, doi: 10.4414/smw.2012.13597. (2012)

Graf, C.: Sammlung und thesenartige Auswertung von Literatur zu der Thematik "Umweltverträglichkeit von Biomassennutzung", Parlamentarischer Beratungs- und Gutachterdienst des Landtags NRW, 01-2007, S. 8 (2007)

Hebisch, R., Fröhlich, N., Karmann, J., Prott, U.: „Exposition gegenüber Abgasen von Dieselmotoren in Abstellbereichen für Fahrzeuge von Feuerwehren und Rettungsdiensten“ Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft 77 (2017) Nr. 11-12/2017, Seiten 473-477 (2017)

Heck, M., Brückel, B., Arhelger, R., Walter, D.: Charakterisierung von Dieselrußemissionen aus Motoren unterschiedlicher Euronorm, Tagungsband, Jahrestagung der Gesellschaft für Thermische Analyse, Gießen (2009)

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Faltblatt Feinstaub (PM₁₀), S. 4-5, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2012)
http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/faltblaetter/PM10_Broschuere.pdf
(Stand:17.01.2017)

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Luftmessnetz, Standorte (2015) <http://www.hlug.de/start/luft/luftmessnetz/standorte.html> (Stand: 08.06.2015)

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG): Informationsblätter „Luftmessstation Gießen Westanlage“; „Luftmessstation Marburg“; „Luftmessstation Marburg-Universitätsstraße“; „Luftmessstation Wetzlar“ (2016)
<http://www.hlnug.de/?id=9231&station=1115> (Stand: 25.11.2016)

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV), Mainzer Straße 80, 65189 Wiesbaden: 1. Fortschreibung, Luftreinhalteplan für das Gebiet Mittel- und Nordhessen, Teilplan Marburg – Entwurf (2015)
http://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/luft/luftreinhalteplaene/2015/Entwurf_1_Fortschreibung_Luftreinhalteplan_Marburg.pdf (Stand: 25.11.2016)

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUKLV), Mainzer Straße 80, 65189 Wiesbaden: 1. Fortschreibung Luftreinhalteplan für das Gebiet Lahn-Dill, Gießen / Wetzlar (2011)

https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/HMUELV/1_fortschreibung_luftreinhalteplan_gebiet_lahn-dillw.pdf (Stand 25.11.2016)

Hoffmann, B., Weinmayr, G., Hennig, F., Fuks, K., Moebus, S., Weimar, C., Dragano, N., Hermann, D.M., Kälisch, H., Mahabadi, A.A., Erbel, R., Jöckel, K.H.: Air quality, stroke and coronary events - results of the Heinz Nixdorf Recall Study from the Ruhr region. Dtsch Arztebl Int, H112, S. 195–201, DOI: 10.3238/arztebl.2015.0195 (2015)

Hund: Staubsammelgerät RESPICON Beschreibung und Betriebsanleitung, Helmut Hund GmbH Postfach 1669 D-35526 Wetzlar, Version: 2.0 Dezember (2000)

IARC: Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths, Press Release N° 221 (2013)

http://www.iarc.fr/en/media-centre/iarcnews/pdf/pr221_E.pdf (Stand: 17.09.2016)

ILSI Risk Science Institute Workshop: The relevance of the rat lung response to particle overload for human risk assessment: A workshop consensus report, Inhal. Toxicol. 12 1-17 DOI: 10.1080/08958370050164833 (2000)

Institut für Hygiene und Umwelt / Staatliches Umweltamt Itzehoe: Untersuchungen zur Zusammensetzung des Feinstaubes in Hamburg und Schleswig-Holstein. (2008)

Kraftfahrt-Bundesamt: Pressemitteilung Nr. 27/2017 - Fahrzeugzulassungen im Oktober 2017,

https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2017/Fahrzeugzulassungen/pm27_2017_n_10_17_pm_komplett.html (Stand 23.11.2017)

Krahl, J.: Die aktuelle Dieseldebatte - können Bio Kraftstoffe ein Teil der Lösung sein? IPA Journal 03/2017, Seite 29-31 (2017)

Lakey P.S., Berkemeier T., Tong H., Arangio A.M., Lucas K., Pöschl U., Shiraiwa M.: Chemical exposure-response relationship between air pollutants and reactive oxygen species in the human respiratory tract. *Sci Rep.* 8;6:32916. doi: 10.1038/srep32916 (2016)

Lipsett, M.; Campleman, S.: Occupational exposure to diesel exhaust and lung cancer: a meta-analysis. *Am. J. Public Health* 89, 1009-1017 (1999)

Lelieveld J., Evans J. S., Giannadaki D., Fnais M., Pozzer A.: The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale, *Nature*, 525 (7569):367-71. doi: 10.1038/nature15371 (2015)

Mauderly, J., Jones, R.K., Griffith, W.C., Henderson, R.F., McClellan R.O.: Diesel exhaust is a pulmonary carcinogen in rats exposed chronically by inhalation. *Fundam Appl Toxicol.* (2):208-21. (1987)

Niermeier M., Walter D.: Wirkungsbezogene Charakterisierung der Exposition gegen Nanoteilchen, Dissertation Gießen, S. 37-66 (2015)

Oberdörster G, Ferin J, Lehnert BE: Correlation between particle size, in vivo particle persistence, and lung injury. *Environ Health Perspect* 102, 173–179 (1994)

Oberdörster, G.: Lung Particle Overload: Implications for Occupational Exposures to Particles *Regul Toxicol Pharmacol.* 21(1):123-35, <https://dx.doi.org/10.1006/rtp.1995.1017> (1995)

Oberdörster G.: Significance of particle parameters in the evaluation of exposure–response relationships of inhaled particles. *Inhal Toxicol*; 8(Suppl 1): 73–89. (1996)

Oberdörster G., Oberdörster E., Oberdörster J.: Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect*; 113: 823-839; (2005)

Peng, R.D., Welty, L.J., McDermott, A.: The national morbidity, mortality, and air pollution study. Database in r., John Hopkins University, Department of Biostatistics Working Papers (44) o.S. (2004)

Peters, A., Wichmann, H. E., Tuch, T., Heinrich, H., Heyder, J.: Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles, *Am J Respir Crit Care Med* 155 1376-1383 (1997)

Pope, C.A. III, Ph.D., Ezzati, M., Ph.D., Dockery, D.W. , Sc.D.: Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States, *N Engl J Med*; 360: S.376-386 (2009)

Pott, F., Roller, M.: Untersuchungen zur Kanzerogenität granulärer Stäube an Ratten – Ergebnisse und Interpretationen, 1. Auflage, S. 60, Projektnummer: F 1843 (2003) <http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/Gd1.pdf> (Stand: 17.01.2017)

Raaschou-Nielsen, O., et al.: Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE), *Lancet Oncol.*, 14(9):813-22. doi: 10.1016/S1470-2045(13)70279-1. (2013)

Regierungspräsidium Gießen: Lärmaktionsplan Gießen, Teilplan Straßenverkehr, (21.03.2016) https://rp-giessen.hessen.de/sites/rp-giessen.hessen.de/files/Laermaktionsplan_endfassung_21_03_2016.pdf Stand: 20.02.2017

Richter-Kuhlmann, E.A.: Feinstaub: Grenzwerte überdenken, *Dtsch Arztebl*; 103(4): A-165 / B-144 / C-143 (2006)

Rödelsperger, K., Brückel, B., Podhorsky, S., Schneider, J.: BAUA Forschungsvorhaben F 2075 Charakterisierung ultrafeiner Teilchen für den Arbeitsschutz – Teil 2 – der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, ISBN 978-3-88261-104-5, Dortmund/Berlin/Dresden (2009)

Rödelsperger, K., Podhorsky, S. Roth, E. : Registrierende Teilchenkonzentrationsmessungen und die Umweltbelastung durch Feinstaub, Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 11/12-2005, S. 463-467 (2005)

Roller, M. : Untersuchungen zur krebserzeugenden Wirkung von Nanopartikeln und anderen Stäuben, 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. ISBN: 978-3-88261-069-7, S. 309, Projektnummer: F2083 (2008)

Roller, M. : Krebserzeugende Wirkung von Nanomaterialien am Arbeitsplatz, Arbeitspapier 221, Hans-Böckler-Stiftung, Mitbestimmungs-, Forschungs- und Studienförderungswerk des DGB (2010)

Schmidt, K.G., Zellner, R.: Statuspapier Feinstaub, S. 11-169, DECHEMA Frankfurt, ISBN-Nr.: 978-3-89746-120-8 (2010)

Schneider, J., Walter, D., Brückel, B., Rödelsperger, K.: Primary particles and their agglomerate formation as modifying risk factors of nonfibrous nanosized dust, Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 76:131-141, DOI: 10.1080/15287394.2013.738411 (2013)

Schulz, H., Peters, A.: Verstaubte Gefäße: Wenn ultrafeine Partikel Herz und Adern schädigen. Broschüre: Aerosolforschung in der GSF. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Neuherberg b. München, S.34-37 (2005)

TSI Incorporated: Model 3007, Condensation Particle Counter Operation and Service Manual, 1930035, Revision E (2006)

TSI Incorporated: RESPICON™ Particle Sampler from TSI, o.V. www.tsi.com (1999)

Umweltbundesamt (UBA): Hintergrundpapier Feinstaubbelastung in Deutschland, S. 7-8 (2009)

Umweltbundesamt (UBA): Hintergrundpapier zum Thema Staub/Feinstaub (PM), S.2-4 (2005)

Umweltbundesamt (UBA): Aktuelle Luftdaten – Feinstaub, Überschreitungen (2016)
<http://www.umweltbundesamt.de/daten/luftbelastung/aktuelle-luftdaten>
(Stand 20.09.2016)

Valberg, P.A., R.J., McCunney, R.J.: Are rat results from intratracheal instillation of 19 granular dusts a reliable basis for predicting cancer risk?, *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, Volume 54, Issue 1, Pages 72–83 (2009)

Veras M. M., Caldini E. G., Dolhnikoff M., Saldiva P. H.: Air pollution and effects on reproductive-system functions globally with particular emphasis on the Brazilian population. *J Toxicol Environ Health B Crit Rev*; 13: 1-15; (2010)

Walter, D.: Primary Particles – Agglomerates - Aggregates, *Nanomaterials*, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, pp. 1-24 doi: 10.1002/9783527673919, (2013)

Wichmann, H.E., Heinrich, J., Peters, A.: *Gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub* Reihe: Fortschritte in der Umweltmedizin, Landsberg (2002)

Witten, J.: Feinstaub (PM₁₀) - Eigenschaften, Quellen, gesundheitliche Bewertung, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Broschüre S.1-16, o.J.
http://www.hlug.de/fileadmin/dokumente/luft/faltblaetter/PM10_Broschuere.pdf
(Stand: 17.01.2017)

Zimmermeyer, G., Lüers, B., Holderbaum, B.: Der Weg zum sauberen Diesel, *Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft*, Ausgabe 6/2017, S. 215-223 (2017)

Publikationsverzeichnis:

Walter, D., Brückel, B., Albeser, S.: Bestimmung toxikologisch relevanter Staubpartikel in der Umwelt – Ein Vergleich zwischen mobilen und stationären Messergebnissen, Posterbeitrag DGAUM – 56. Wissenschaftliche Jahrestagung (2016)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank nachstehenden Personen entgegen bringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals möglich gewesen wäre:

Prof. Dr. med. Joachim Schneider, für die Vergabe des Promotionsthemas und für die Möglichkeit diese Arbeit im Institut für Arbeits- und Sozialmedizin in Gießen durchführen zu können. Seine wertvollen Anregungen und die immer rasche Beantwortung meiner Fragen habe ich sehr zu schätzen gelernt.

Prof. Dr. Dr. Klaus Rödelberger für die Inspiration zu dieser Arbeit, Prof. Dr. Dr. Dirk Walter für seine Hilfsbereitschaft bei fachlichen Fragen.

Dipl. Ing. Bernd Brückel und Dipl. Ing. Rolf Arhelger sowie dem Team des Gefahrstofflaboratoriums Physik für die Unterstützung insbesondere zu Beginn der Arbeit sowie deren Hilfe bei technischen Problemen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, Astrid und Hans Walter Albeser. Sie haben mir meine Ausbildung sowie mein Studium ermöglicht und haben mich immer unterstützt. Ihnen ist diese Arbeit gewidmet.

Erklärung zur Dissertation

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

Ort, Datum

Unterschrift